

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 22

*Научно-теоретический журнал*

*Издается с октября 2005 года  
Выходит 4 раза в год*

ISSN 2074-2762



*Санкт-Петербург  
2011*

УДК 3 + 502.52 + 55

ББК 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 22. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2011. – 242 с.

ISSN 2074-2762

Представлены статьи сотрудников университета и приглашенных специалистов по широкому спектру направлений научной деятельности университета.

Материал сгруппирован по специальностям. Главное внимание уделено проблемам изменения климата, физических процессов в морях, водохозяйственных исследований, экономических механизмов рационального природопользования. В разделе «Хроника» освещены основные события жизни университета.

Предназначен для ученых, исследователей природной среды, экономистов природопользования, аспирантов и студентов, обучающихся по данным специальностям.

Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal. Issue 22. – St. Petersburg: RSHU Publishers, 2011. – 242 pp.

The journal presents research papers of the University associates and invited specialists dealing with a broad range of directions in the scientific activities of the University.

The material is grouped according to areas of research. Much attention is given to problems of climate change, physical processes in the seas, water management studies, economic mechanisms of rational nature management. Section “Chronicle” highlights major events in the University’s life.

The journal is intended for scientists studying the environment, specialists in economics of nature management, PhD students and undergraduates specializing in these fields of knowledge.

*Редакционная коллегия:*

*Главный редактор:* Л.Н. Карлин, д-р физ.-мат. наук, проф.

*Зам. главного редактора:* В.Н. Воробьев, канд. геогр. наук.

*Члены редколлегии:* А.М. Владимиров, д-р геогр. наук, проф., Л.П. Бескид, д-р техн. наук, проф., В.Н. Малинин, д-р геогр. наук, проф., И.Г. Максимова, отв. секретарь, Н.П. Смирнов, д-р геогр. наук, проф., А.И. Угрюмов, д-р геогр. наук, проф., И.П. Фирова, д-р эконом. наук, проф.

ISSN 2074-2762

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал зарегистрирован в Управлении Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному Федеральному округу.

Свидетельство ПИ № ФС2-8484 от 7.02.2007 г.

Специализация: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология, геофизика, общественные и гуманитарные науки.

Подписной индекс 78576 в каталоге «Каталог российской прессы «Почта России».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки <http://elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции: Россия, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

Тел.: (812) 444-81-55

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2011

© Авторы публикаций, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

### Гидрология

<i>Н.Б. Барышников, Е.А. Поташко, Е.М. Скоморохова, Е.С. Субботина.</i> Антропогенное воздействие на пойменные процессы и гидравлику руслопойменных потоков . . . . .	7
<i>Н.Б. Барышников, М.В. Соболев, Е.А. Поташко, Т.В. Векшина.</i> Гидрологические риски при обеспечении минимальных транзитных глубин на судоходных реках . . . . .	13
<i>В.А. Кузьмин, А.В. Дикинис.</i> Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока . . . . .	16
<i>В.А. Кузьмин, А.Г. Сурков, К.В. Шеманаев.</i> Принципы автоматической обработки данных в автоматизированных системах прогнозирования стока . . . . .	28
<i>В.А. Кузьмин, У.Е. Коротыгина, И.С. Макин, С.Ю. Сергеенко, Д.Ю. Румянцев.</i> Фоновое прогнозирование стока в режиме, близком к реальному времени . . . . .	38
<i>В.А. Кузьмин, Р.Е. Ванкевич, К.В. Шеманаев.</i> Оценивание увлажненности водосбора по данным дистанционного зондирования, наземных гидрометрических наблюдений и математического моделирования стока. Аннотация . . . . .	45
<i>Н.Б. Барышников, М.В. Соболев, Е.А. Поташко, Е.М. Скоморохова, Е.С. Субботина.</i> Разработка принципов оптимального размещения гидротехнических сооружений на берегах и в руслах рек в целях минимизации потенциальных гидрологических рисков . . . . .	58

### Метеорология

<i>А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая, А.А. Ошуркова.</i> Интегральные методы лидарного зондирования атмосферы импульсами конечной длительности . . . . .	69
<i>О.П. Боровская, П.А. Блакитная, С.П. Смышляев, В.Я. Галин, Е.И. Хорева.</i> Моделирование взаимосвязанных изменений температуры и газового состава атмосферы в будущем . . . . .	75
<i>Т.В. Суходолов, П.А. Блакитная, О.П. Боровская, С.П. Смышляев.</i> Модельное исследование одновременных изменений содержания озона и температуры стратосферы . . . . .	90
<i>А.П. Филиппенко, П.А. Блакитная, А.Р. Курганский, С.П. Смышляев, Т.В. Суходолов.</i> Анализ состава выбросов химически активных газов в регионе Санкт-Петербурга и потенциала для их трансграничного переноса . . . . .	104
<i>Е.И. Хорева, С.В. Мостаманди, Л. Ронту, А.А. Бакланов.</i> Прямые аэрозольные эффекты в одномерной версии региональной метеорологической модели Hirlam . . . . .	114
<i>А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая, Н.А. Саноцкая, В.А. Драбенко, А.А. Ошуркова.</i> Минимизация погрешностей обращения слабых сигналов обратного рассеяния . . . . .	123
<i>П.А. Блакитная, С.П. Смышляев, В.Я. Галин.</i> Влияние выбросов токсичных газов в зонах интенсивных эмиссий загрязняющих веществ на состав и температуру атмосферы . . . . .	128
<i>А.П. Филиппенко, С.П. Смышляев, П.А. Блакитная, А.Р. Курганский, С.В. Мостаманди.</i> Моделирование суточного хода химических газовых составляющих атмосферы в зонах интенсивных выбросов загрязняющих веществ . . . . .	136
<i>А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая.</i> Обращение слабых сигналов обратного рассеяния . . . . .	144
<i>С.П. Смышляев, В.Я. Галин, М.А. Моцаков, Т.В. Суходолов, Е.И. Хорева.</i> Моделирование влияния аэрозоля на изменения температуры и состава атмосферы . . . . .	149

### Океанология

<i>Е. В. Заболотских, Л. П. Бобылев, А. В. Дикинис.</i> Использование данных реанализа и спутниковых измерений для оценки количественных характеристик штормовых мезоциклонов . . . . .	157
<i>О.И. Шевчук, В.Н. Малинин.</i> Влияние эффективного испарения на уровень мирового океана . . . . .	171

### Геофизика

<i>О.П. Боровская, С.П. Смышляев, Т.В. Суходолов.</i> Алгоритм оценки атмосферных условий, способствующих увеличению уровня химической загрязненности природной среды . . . . .	177
<i>Я.А. Гонцов, С.П. Смышляев, А.Р. Курганский, С.В. Мостаманди.</i> Моделирование химических процессов в нижней атмосфере регионов Российской Федерации . . . . .	183

<i>С.П. Смышляев, Я.А. Гонцов, Е.И. Хорева.</i> Оценки времени нахождения в атмосфере химически активных антропогенных газов . . . . .	195
<i>С.П. Смышляев, П.А. Блакитная, М.А. Моцаков.</i> Модель влияния антропогенных газовых выбросов на химические процессы в геосфере . . . . .	204
<b>Экология</b>	
<i>А.В. Илларионов, А.А. Лебедева, Д.В. Шилов.</i> Разработка комплексной программы системы наблюдений за состоянием окружающей среды вблизи полигона токсичных отходов «Красный Бор» . . .	211
<i>А.В. Дикинис, А.В. Илларионов, А.А. Лебедева, Д.В. Шилов, Е.Д. Родионова.</i> Учет гидрометеорологических условий в технологических циклах обращения с отходами производства и потребления . .	221
<b>Социально-гуманитарные науки</b>	
<i>В.Д. Денисов.</i> Герой-художник в повестях Н. В. Гоголя «Портрет» и «Невский проспект» (1835) и в романтической повести о художнике 1830-х годов . . . . .	228

## CONTENTS

### Hydrology

<i>N.B. Barishnikov, E.A. Potashko, E.M. Skomorohova, E.S. Subbotina.</i> Anthropogenic impact on floodplain processes and hydraulics of floodplain-riverbed streams . . . . .	7
<i>N.B. Baryshnikov, M.V. Sobolev, E.A. Potashko, T.V. Vekshina.</i> Hydrological risks, while ensuring minimum transit depths in navigable rivers . . . . .	13
<i>V.A. Kuzmin, A.V. Dikinis.</i> Integrated usage of remotely sensed data, surface observations, and NWP output in the automated stream flow forecasting . . . . .	16
<i>V.A. Kuzmin, A.G. Surkov, K.V. Shemanaev.</i> Principles of automatic data processing in automated streamflow forecasting systems . . . . .	28
<i>V.A. Kuzmin, U.E. Korotygina, I.S. Makin, S.Yu. Sergeenko, D.Yu. Rumyantsev.</i> The background NRT streamflow forecasting . . . . .	38
<i>V.A. Kuzmin, R.E. Vankevich, K.V. Shemanaev.</i> Assessing catchment moisture content by using remotely sensed data, in situ observations and mathematical streamflow modelling . . . . .	45
<i>N.B. Barishnikov, M.V. Sobolev, E.A. Potashko, E.M. Skomorohova, E.S. Subbotina.</i> Development principles of optimal placing of the hydraulic works on banks and riverbeds for minimization potential hydrological risks . . . . .	58

### Meteorology

<i>A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Y.B. Rzhonsnitskaya, A.A. Oshurkova.</i> Lidar probing of atmospheric aerosol pollutions by integral methods using finite duration pulses . . . . .	69
<i>O.P. Borovskaya, P.A. Blakitnaya, S.P. Smyshlyaev, V.Ya. Galin, E.I. Khoreva.</i> Modeling of the coupled atmospheric temperature and chemical composition variability in future . . . . .	75
<i>T.V. Sukhodolov, P.A. Blakitnaya, O.P. Borovskaya, S.P. Smyshlyaev.</i> A model study of the simultaneous stratospheric ozone and temperature variability . . . . .	90
<i>A.P. Filippenko, P.A. Blakitnaya, A.R. Kurgansky, S.P. Smyshlyaev, T.V. Sukhodolov.</i> Chemical species emissions at the St.Petersburg region and their trans boundary transport to the remote areas . . . . .	104
<i>E.I. Khoreva, S.V. Mostamandi, L. Rontu, A.A. Baklanov.</i> Direct aerosol effects in the one-dimensional regional meteorological model hirlam . . . . .	114
<i>A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Y.B. Rzhonsnitskaya, N.A. Sanotskaya, V.A. Drabenko, A.A. Oshurkova.</i> Minimization of weak backscattering signals inverting errors . . . . .	123
<i>P.A. Blakitnaya, S.P. Smyshlyaev, V.Ya. Galin.</i> Impact of toxic gases emissions in the regions with intensive pollutions sources on the atmospheric chemical composition and temperature . . . . .	128
<i>A.P. Filippenko, S.P. Smyshlyaev, P.A. Blakitnaya, A.R. Kurgansky, S.V. mostamandi.</i> Modeling of chemical composition diurnal variations in the regions with intense pollutant emissions . . . . .	136
<i>A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Y.B. Rzhonsnitskaya.</i> Weak backscattering signals inverting . . . . .	144
<i>S.P. Smyshlyaev, V.Ya. Galin, M.A. Motsakov, T.V. Sukhodolov, E.I. horeva.</i> A model study of the aerosol particles impact on the atmospheric temperature and composition changes . . . . .	149

### Oceanology

<i>E.V. Zabolotskich, L.P. Bobilev, A.V. Dikinis.</i> Use reanalysis data and satellite measurements estimates for the quantitative characteristics of storm mezotsiklonov . . . . .	157
<i>O.I. Shevchuk, V.N. Malinin.</i> Influence of effective evaporation at sea level . . . . .	171

### Geophysics

<i>O.P. Borovskaya, S.P. Smyshlyaev, T.V. Sukhodolov.</i> Chemical lifetime estimations for atmospheric anthropogenic species . . . . .	177
<i>Ya.A. Gontsov, S.P. Smyshlyaev, A.R. Kurgansky, S.V. Mostamandi.</i> Chemical processes modeling in the low atmosphere of the Russian regions . . . . .	183
<i>S.P. Smyshlyaev, Ya.A. Gontsov, E.I. Horeva.</i> Chemical lifetime estimations for atmospheric anthropogenic species . . . . .	195
<i>S.P. Smyshlyaev, P.A. Blakitnaya, M.A. Motsakov.</i> A model of the man-made gaseous emissions impact on the chemical processes in the geosphere . . . . .	204

**Ecology**

*A.V. Illarionov, A.A. Lebedeva, D.V. Shilov.* Develop schemes for integrated surveillance systems environment near the range of toxic waste “Krasny Bor” . . . . . 211

*A.V. Dikinis, A.V. Illarionov, A.A. Lebedeva, D.V. Shilov, E.D. Rodionova.* Accounting hydrometeorological conditions in the work cycle waste management of production and consumption . . . . . 221

**Social science and humanities**

*V.D. Denisov.* The hero-artist in the novellas «The Portrait» and «The Nevsky Prospect» (1835) by Nikolai Gogol and the romantic story about the artist of the 1830s. . . . . 228

*Н.Б. Барышников, Е.А. Поташко, Е.М. Скоморохова, Е.С. Субботина*

## **АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОЙМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ГИДРАВЛИКУ РУСЛОПОЙМЕННЫХ ПОТОКОВ**

*N.B. Barishnikov, E.A. Potashko, E.M. Skomorohova, E.S. Subbotina*

## **ANTHROPOGENIC IMPACT ON FLOODPLAIN PROCESSES AND HYDRAULICS OF FLOODPLAIN-RIVERBED STREAMS**

*Выполнен анализ результатов антропогенного воздействия на процессы формирования пойм и пойменные процессы. Рассмотрены три вида этого воздействия на: климат, бассейн реки и её русло и пойму. В качестве иллюстрации выполнен анализ воздействия строительства и эксплуатации Чебоксарского водохранилища на формирование и развитие пойм.*

*Ключевые слова: пойма, русло, антропогенное воздействие, верхний и нижний бьефы, водохранилище, карьеры, бассейн, климат.*

*Analysis of the results of anthropogenic impact on floodplain-forming processes and floodplain processes has been done. Three types of this impact have been examined on the: climate, water-collecting area and its riverbed and floodplain. Analysis of impact of the building and exploitation of the reservoir of Cheboksary on the floodplain forming and development has been done by way of illustration.*

*Key words: floodplain, riverbed, anthropogenic impact, headwater and downstream, reservoir, pits, basin, climate.*

Антропогенное воздействие на природу в целом и речные бассейны в частности непрерывно возрастает. Все его виды можно подразделить на три группы: воздействие на климат, бассейн реки, русло, пойму и руслопойменный поток. Воздействие на климат, совершенно чётко стало проявляться с начала 90-х годов прошлого столетия. Дискуссионность этой проблемы заключается в том, что до настоящего времени не становится ясной причина потепления климата. Это либо естественный процесс, связанный с космическими причинами (солнечная активность, изменение орбиты земли или угла наклона оси земли и др.), либо непосредственно антропогенное воздействие, обусловленное выбросами в атмосферу как тепловой энергии, так и различных газов, формирующих парниковый эффект. Оставив на совести климатологов решение этой проблемы, отметим лишь, что воздействие климата на процессы формирования пойм является не прямым, а опосредованным и в основном проявляется

через осадки и испарение. Влияние этого фактора резко возросло в последние 15-20 лет. В частности, считается, что глобальная температура воздуха за этот период увеличилась на  $0,7^{\circ} \pm 0,2^{\circ}$  и продолжает повышаться. Следствием этого являются катастрофические паводки, прошедшие в конце 90-х годов прошлого и начале этого века. Особенно большой ущерб, вызванные ими наводнения, нанесли странам Восточной Европы (Польша, Чехия, Румыния и др.) и южной Азии (Пакистан, Индия и др.). В частности, по оценке польских специалистов обеспеченность максимальных расходов воды, прошедших на р. Висле в 2010 году, составляет 0,33 – 0,1 %. Эти паводки нанесли большой экономический ущерб. Так например, из-за наводнений в Польше и Чехии были вынуждены переселить жителей посёлков с численностью более двух тысяч человек. И всё таки, эти паводки нельзя сравнить с катастрофическими паводками в экваториальной и тропической зонах. Так М.А. Стивенс [1] приводит описание катастрофических паводков на реках экваториальной зоны, в результате которых пойма, заросшая густым тропическим лесом, была полностью размыва. В результате образовалось канализированное русло, шириной равной суммарной ширине русла и поймы. Однако через 2-3 года пойма полностью восстановилась. В России близкие к таким паводкам наблюдались в Приморье и на Дальнем востоке. Они разрушали мосты и другие гидротехнические сооружения. Однако, несмотря на то, что на некоторых малых и даже средних реках были затоплены водоразделы, полного смыва пойм, как это наблюдалось в экваториальной и тропической зонах, не наблюдалось. В последние годы катастрофические паводки прошли на ряде рек юга ЕТР. В частности на р. Кубань, в период с 2002 по 2010 годы прошло несколько высоких паводков, максимальные расходы которых значительно превысили расчётные 1% обеспеченности, нанеся большой экономический ущерб и даже унесли человеческие жизни.

Ко второй группе следует отнести антропогенное воздействие на бассейн реки. Это воздействие так же является опосредованным и проявляется через перераспределение жидкого стока и, в частности увеличение максимальных расходов воды и стока наносов. Действительно, все виды хозяйственной деятельности в бассейне реки, как правило, оказывают негативное воздействие на речной сток и сток наносов. В качестве примера можно привести мелиорацию, вырубку лесов, строительство дорог и мостов и др. При этом на пойме обычно разрушается дернина, что обуславливает повышенный размыв поверхностных слоев её почв и, как следствие, интенсивное поступление в речные русла продуктов разрушения. При вырубке лесов и последующей в интересах сельского хозяйства мелиорации происходит увеличение поверхностного стока и, как следствие, максимальных расходов воды. Последние являются одним из основных факторов в процессе формирования пойм, в частности, за счёт увеличения глубины и продолжительности их затопления. При этом существенно увеличивается отложение ила на поймах, нивелирующее рельеф их поверхности. Более того, увеличиваются скорости перемещения русловых образований и процессы намыва и размыва пойм и пойменных массивов.

Наибольшие воздействия на процессы формирования пойм и гидравлику русло-пойменных потоков оказывают составляющие третьей группы, а именно гидротехнические сооружения и водохозяйственные мероприятия, проводимые непосредственно в руслах и на поймах рек. При этом особенно большое воздействие оказывают, так

называемые активные сооружения [2], которые не только существенно воздействуют на русловые процессы и процессы формирования пойм, но могут принципиально изменить эти процессы. Действительно, регулирующие водохранилища не только полностью затапливают и подтапливают поймы в верхних бьефах, но изменяют процессы их формирования в нижних бьефах. Существенное, но значительно меньшее воздействие оказывают и другие сооружения этой группы. При строительстве таких сооружений возникают гидрологические риски. Для их минимизации необходимо проводить комплекс мероприятий. Рассмотрим некоторые из этих рисков и наметим пути их минимизации. Наибольшие риски возникают при выборе мест расположения гидротехнических сооружений и проведения различных водохозяйственных мероприятий. В частности, выбор места расположения плотины водохранилища тесно связан с величиной напора на ГЭС. Действительно, именно от отметки наивысшего проектного уровня и режима работы ГЭС зависят величины площадей затопления и подтопления не только пойменных земель, но и всей долины. Особенно остро этот вопрос стоит на равнинных реках, где длины водохранилищ могут достигать нескольких десятков и даже сотен километров.

Очень чётко это проявилось при строительстве и эксплуатации Чебоксарской ГЭС, водохранилище которой заполнено только до отметки в 63,0 метра, вместо проектной в 68,0 метров. Причиной этого явились большие площади затопления и подтопления при достижении проектной отметки, в частности подтопления низинных участков города Нижний Новгород.

В то же время необходимо рассмотреть и другие варианты решения проблемы, в частности строительство низконапорной плотины с мостовым переходом по её верху.

К сожалению, решение этой проблемы откладывается, несмотря на большие убытки из-за потерь в выработке электрической энергии и особенно из-за затруднений судоходству на участке Городец – Н. Новгород.

Таким образом, регулирующие сток водохранилища оказывают большое воздействие на процессы формирования пойм, разделяя реку на два бьефа – верхний и нижний. Русловые и пойменные процессы в этих бьефах, как правило, являются противоположными. Так верхние бьефы водохранилищ характеризуются процессами затопления пойм и заполнения их наносами. Дополнительным фактором поступления наносов является разрушение берегов водохранилищ, за счёт которого объём поступлений наносов может достигать 40-50% объёма водохранилища. Основная часть этого объёма откладывается на затопленных поймах.

Особенно сложные процессы происходят в зонах переменного подпора водохранилищ, где из-за пускового режима работы ГЭС, процессы отложения наносов сменяются размывом русел и пойм.

По данным С.Л. Вендрова [3], площади зеркала существовавших на территории бывшего СССР водохранилищ составляли 12 млн. га и 13 млн. га перспективных. Учитывая, что давность информации превышает 50 лет и большинство перспективных ГЭС, приведенных в работе Вендрова, в настоящее время уже построено, общую площадь водохранилищ можно принять близкой к 25 млн. га.

В то же время по оценкам Н.Н. Пельт [4] примерно 40 % площади зеркала водохранилищ приходится на затопленные поймы. Следовательно, общая площадь

затопленных пойм на территории бывшего СССР может быть оценена примерно в 10 млн. га. Однако эта цифра не включает площади подтопленных пойм, на которых из-за значительного повышения уровня грунтовых вод резко изменяется характер растительности. Вместо высокопродуктивных пойменных лугов образуются непродуктивные в том числе и болотные массивы, поэтому подтопленные поймы также исключаются из сельскохозяйственного использования. Н.И. Хирсанов и Н.В. Арефьев [5] приводят другие цифры. Так, общая площадь затопления пойм на территории бывшего СССР на 1990 г. составляла 6,47 млн. га. Эта цифра примерно в 2 раза меньше, приведенной Вендровым. По-видимому, авторы применяли различные методики расчетов.

Таким образом, водохранилища ГЭС практически выводят из сельскохозяйственного и другого использования затопляемые и подтопляемые поймы не только на основном водотоке, но и на его притоках. При этом по мере повышения отметок дна из-за отложения наносов в зоне начального выклинивания подпора последний распространяется вверх по течению реки иногда на десятки километров, резко изменяя режим формирования пойм на этом участке.

В верхних бьефах ГЭС также часто происходит затопление или подтопление городов и поселков, особенно расположенных на поймах. Как правило, их переносят на более высокие места, находящиеся вне зоны подтопления водохранилищ. Например, в зону затопления водохранилища Красноярской ГЭС попало 133 населенных пункта, а в зону затопления и подтопления водохранилищем Саяно-Шушенской ГЭС - 19 поселков.

На больших водохранилищах возникает ветровое волнение, разрушающее их берега и затрудняющее судоходство. Это приводит к необходимости переноса поселков, деревень и других объектов за зону прогнозируемого размыва. При ошибках расчетов размеров размыва берегов вновь построенные поселки и деревни разрушаются и их приходится опять переносить или заново отстраивать. Так, на Братском водохранилище во время шторма произошло разрушение берега, вызвавшее большой оползень, разрушивший горняцкий поселок. Причиной этого был плавун органического происхождения.

Более сложные процессы происходят в нижних бьефах водохранилищ. Действительно, плотины гидроузлов, разделяя реки на верхний и нижний бьефы, создают водохранилища, регулирующие сток воды и задерживающие наносы. Поэтому режим жидкого стока и стока наносов в нижних бьефах гидроузлов, как правило, коренным образом изменяется. Жидкий сток выравнивается внутри года, а иногда и в многолетнем плане, максимальные расходы воды уменьшаются, а минимальные увеличиваются как в летний, так и в зимний периоды. Сток воды приобретает резко выраженный неустойчивый характер за счет попускового режима работы ГЭС. При этом, как правило, изменяется характер распределения скоростей по глубине потока, в частности, наблюдается значительное увеличение донных скоростей (при тех же средних), что приводит к повышенной размывающей способности потока.

Сток наносов, особенно в первые годы работы водохранилищ, задерживается ими и в нижние бьефы не поступает. Такая вода, лишенная наносов, называется осветленной водой.

Все это приводит к нарушению баланса наносов, так как транспортирующая способность потоков в нижних бьефах превышает расходы наносов, поступающих из верхних бьефов. Именно это в совокупности с изменением гидрографа и режима стока служит основной причиной деформаций размыва, наблюдающихся в нижних бьефах гидроузлов.

Эти деформации обычно подразделяются на две составляющие, а именно: местный приплотинный размыв и общий размыв нижнего бьефа. Последний может распространяться на десятки и даже сотни километров от плотины ГЭС. Не вдаваясь в детальный анализ причин и методов расчёта глубин размыва, так как он выполнен в ряде работ [2,6], отметим лишь, что при этом значительно увеличиваются объёмы русел и происходят посадки уровней [8,9]. Величины последних могут достигать нескольких метров и распространяться на десятки километров. Особенно они велики при разработке в нижних бьефах ГЭС русловых карьеров. Примером может служить р. Обь ниже Новосибирской ГЭС. Посадка меженных уровней и изменения характера русловых деформаций произошли здесь в результате как зарегулированности стока, так и забора из русла аллювия. Заложенные в проект ГЭС прогнозы предела максимальных деформаций не оправдались. Предполагалось, что зона активного размыва не распространится от створа гидроузла более чем на 3 – 4 км при посадке уровня на верхней границе участка (за 50 лет эксплуатации ГЭС) до 0,5 м. Фактически уже за 25 лет после постройки ГЭС зона размыва распространилась на 40 км, понижение проектного уровня в створе гидроузла составило 1,6 м, а по Новосибирскому гидрологическому посту (ниже на 20 км) примерно 0,4 м. Развитию зоны размыва сопутствует перемещение района отложений [7].

Таким образом, процессы формирования пойм в нижних бьефах ГЭС резко изменяются, вплоть до изменения типов руслового процесса и типа пойм. Это, в основном обусловлено резким сокращением частоты и продолжительности их затопления. Другим существенным фактором является вынос на поймы вместо плодородных гумусных частиц, песков из нижних бьефов ГЭС.

Существенные, но менее значительные процессы, наблюдаются и при строительстве других активных гидротехнических сооружений и проведении различных водохозяйственных мероприятий в руслах и на поймах рек. Однако это выходит за рамки данной статьи и будет освещено в последующих работах.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П1385 от 02 сентября 2009 г.) по направлению «Снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф».

### Литература

1. *Stevens M.A., Simons D.B., Richardson E.V.* – Non-equilibrium form. – J. Hydraul. Div. Proc. ASCE, 1975, vol.101, № 5, p. 557–566.
2. *Барышников Н.Б.* Русловые процессы [Текст] / Н.Б. Барышников // – СПб.: изд-во РГГМУ, 2008. – 438с.
3. *Вендров С.Л.* Проблемы образования речных систем [Текст] / С.Л. Вендров // – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 208с.
4. *Пельт Н.Н.* Развитие кормовой базы животноводства в СССР [Текст] / Н.Н. Пельт // – М.: Наука, 1969. – 184 с.

5. *Хрисанов Н.И. , Арефьев Н.В.* Управление эвтрофированием водоёмов [Текст]/ Н.И. Хрисанов, Н.В. Арефьев – СПб.: Гидрометеиздат, 1993.–133с.
6. *Векслер А.Б., Доненберг В.М.* Рекомендации трансформации русла в нижних бьефах ГЭС [Текст]/ А.Б. Векслер, В.М. Доненберг– СПб.: изд. ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева,2006.–102с.
7. *Дегтярёв В.В.* Улучшение судоходных условий Сибирских рек [Текст]/ В.В. Дегтярёв //– М.: Транспорт,1987.–176с.
8. *Исаев Д.И.* Процессы сортировки донных наносов [Текст] / Д.И. Исаев // –СПб.: Ученые записки, РГГМУ, №5, 2007. – с.77-82.
9. *Пагин А.О., Селина Т.С., Тимофеева О.Д.* Экспериментальные исследования влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт наносов [Текст] / Пагин А.О., Селина Т.С., Тимофеева О.Д. // –СПб.: Ученые записки, РГГМУ, №5, 2007. – с.111-118.

*Н.Б. Барышников, М.В. Соболев, Е.А. Поташко, Т.В. Векшина*

## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ МИНИМАЛЬНЫХ ТРАНЗИТНЫХ ГЛУБИН НА СУДОХОДНЫХ РЕКАХ

*N.B. Baryshnikov, M.V. Sobolev, E.A. Potashko, T.V. Vekshina*

## HYDROLOGICAL RISKS, WHILE ENSURING MINIMUM TRANSIT DEPTHS IN NAVIGABLE RIVERS

*Приведены результаты анализа гидрологических рисков, возникающих при обеспечении минимальных транзитных глубин на судоходных реках. Установлено, что основными их причинами являются: несовершенство методов расчётов и прогнозов величин намыва гребней перекатов в периоды подъёма уровней и размыва в периоды спада уровней и в меженные, а так же антропогенный фактор.*

*Ключевые слова: перекат, минимальная транзитная глубина, гидрологические риски, дноуглубление, земснаряды.*

*Results of the analysis of hydrological risks involved in providing the minimum depth of the transit on navigable rivers. It is established that their main reasons are: the imperfection of the methods of calculations and projections of the quantities reclamation ridges rifts during recovery levels and erosion during periods of recession and low-water levels, as well as anthropogenic factors.*

*Key words: roll, the minimum transit depth, hydrological risks, dredging, dredging equipment.*

В конце XIX – начале XX веков водный транспорт в России был наиболее важным средством перевозки грузов. Действительно, практически полное отсутствие дорог с твердым покрытием, по которым грузы перемещались с помощью конной тяги, и отсутствие других транспортных средств, приводило к тому, что водный транспорт, являясь основным видом транспорта, использовался на большинстве рек России. Стоимость перевозки грузов при этом в основном зависела, да и сейчас зависит от водоизмещения судов. При их увеличении она существенно уменьшалась. Это обусловлено тем, что затраты на единицу массы груза уменьшались при увеличении водоизмещения судна, в связи с уменьшением затрат на содержание экипажа и горючего. Однако водоизмещение судов находилось в прямой зависимости от морфологического строения речных русел, их ширин, кривизны излучин и глубин на перекатах. Так ширина судов лимитируется шириною судового хода, длина – зависит от кривизны излучин, а осадка судна – глубиной на лимитирующих перекатах. В конце XIX – начале XX веков для увеличения осадки судов перекаты разрабатывались вручную, что безусловно, было мало эффективным. Так минимальные транзитные глубины на р. Волге, основной транзитной магистрали России, составляли 0,9–1,1 метра. В этот период проводилась острая дискуссия между сторонниками увеличения транзитных глубин методами выправления или дноуглубления. Тот и другой способы имели свои

достоинства и недостатки. Выправление было основано на том, что поток сам, используя свою энергию, должен размывать перекаты. Однако в этом случае продукты размыва в основном откладывались на нижерасположенных перекатах, что значительно снижало эффективность методики. Более того, увеличение энергии потока достигалось за счёт его стеснения на перекате дамбами, которые часто разрушались в периоды паводков и половодий, что приводило к низкой эффективности методики и к большим затратам. Последние резко повышались при строительстве дамб на участках большой протяжённости. Однако это не снимало основного недостатка методики, заключающегося в высокой стоимости и недостаточной надёжности.

Безусловно, при работах по углублению перекатов вручную, выправление было вполне конкурентным. С появлением же паровых дноуглубительных снарядов на первое место вышло дноуглубление и особенно в сочетании с выправлением рек. Применение земснарядов на большинстве рек, используемых для судоходства, привело к увеличению минимальных транзитных глубин в 1,5–2,0 раза и количеству транспортного флота России. Так суммарное водоизмещение речного флота только на р. Волге в 1913 году превышало водоизмещение торгового флота Англии.

В последующий период, с целью исключения дополнительных затрат, на разгрузку и последующую загрузку судов при преодолении переката, минимальная глубина, которого меньше их осадки, было введено понятие минимальной транзитной глубины, т.е. такой минимальной глубины, которая была бы обеспечена на расчётном участке реки – судоходном плёсе, длина которого составляла сотни и даже тысячи километров. Обеспечение этой глубины производилась с помощью технического флота, который разрабатывал гребни лимитирующих перекатов в период предшествующий навигационному. Разработка перекатов осуществлялась с таким расчётом, чтобы минимальная глубина, отсчитываемая от проектного уровня, была больше минимальной транзитной на величину намыва переката в период пропуска паводка. При этом возникает несколько гидрологических рисков. Первый – это выбор лимитирующих перекатов, т.е. перекатов на которых глубины могут быть меньше минимальных транзитных, и которые подлежат разработке. Вторым риском является определение величины намыва гребня переката особенно в период подъёма уровней, которая определяет дополнительную величину переуглубления переката. Следующим риском является определение величины размыва гребня переката в период спада уровней. Все эти риски имеют вероятностную основу и погрешности расчётов увеличивают величины гидрологических рисков.

Следует отметить, что более радикальным средством обеспечения минимальных транзитных глубин является сплошное регулирование рек с помощью водохранилищ. Наиболее наглядным примером является строительство регулирующих водохранилищ на р. Волге, которые должны были обеспечить минимальную транзитную глубину от Астрахани до Москвы в 4 метра. Завершающим звеном в строительстве водохранилищ была Чебоксарская ГЭС, водохранилище которой должно было быть заполнено до проектной отметки в 68 метров. Однако из-за больших величин затопления плодородных земель и, что так же важно, подтопления больших территорий и в частности пониженных участков г. Нижний Новгород, оно было заполнено только до отметки 63,0 метра [1]. Несмотря на ущербы от потери больших объёмов электри-

ческой энергии и, что особенно важно, резкого падения минимальных транзитных глубин до 2,3 м вместо 4,0 м, наносящих большие ущербы судоходству, проблема до настоящего времени не решена.

Действительно, на участке от г. Городец, где расположена Горьковская ГЭС, до г. Н. Новгорода минимальная транзитная глубина уменьшается до 2,3 метра и пропуск в меженный период судов, имеющих осадку больше 2,3 м, осуществляется на гребне попусков из водохранилища Горьковской ГЭС.

Рассматривается два варианта решения проблемы. Первый, как указывалось, наполнение водохранилища до отметки 68,0 метров, но он приводит к большим убыткам. Второй – строительство низконапорной плотины в районе г. Н. Новгорода с одновременным строительством моста через р. Волгу по гребню плотины. Оба варианта находятся на рассмотрении в соответствующих ведомствах. При этом необходимо учитывать, что на реках, где отсутствует каскад ГЭС, могут возникнуть дополнительные риски, обусловленные погрешностями расчётов глубин размыва и посадки уровней. Дополнительные гидрологические риски также возникают при строительстве в нижних бьефах ГЭС различных гидротехнических сооружений и проведений водохозяйственных мероприятий. Одним из таковых являются большие русловые карьеры, возведение которых сопровождается посадкой уровней и, как следствие, значительным ухудшением условий судоходства, т.е. уменьшения минимальных транзитных глубин [2].

В заключение следует отметить, что основными причинами гидрологических рисков, в частности при обеспечении нормального судоходства, являются: человеческий фактор, несовершенство методов расчётов русловых деформаций и отсутствие в директивных документах результатов научных достижений [3,4].

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П1079 от 24 августа 2009 г.) по направлению «География и гидрология суши».

### Литература

1. *Барышников Н.Б.* Русловые процессы [Текст] / Н.Б. Барышников // – СПб.: изд-во РГГМУ, 2008.–438 с.
2. *Беркович К.М.* Русловые процессы и русловые карьеры [Текст] /К.М. Беркович //– М.: изд-во МГУ, 2005.–109 с.
3. *Бузин В.А., Шилов Д.В., Дьяченко Н.Ю., Солощук П.В.* Прогнозирование опасных ледовых явления на реке Нева [Текст] / В.А. Бузин, Д.В. Шилов, Н.Ю. Дьяченко, П.В. Солощук //– СПб.: Ученые записки, РГГМУ, №14, 2010.– с.25-34.
4. *Исаев Д.И., Соболев М.В.* Расчет стока наносов реки Невы [Текст] / Д.И. Исаев, М.В. Соболев // – СПб.: Ученые записки, РГГМУ, №12, 2010.– с.20-24.

*В.А. Кузьмин, А.В. Дикинис*

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ, НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННЫХ  
ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ  
ПРОГНОЗИРОВАНИИ СТОКА**

*V.A. Kuzmin, A.V. Dikinis*

**INTEGRATED USAGE OF REMOTELY SENSED DATA, SURFACE  
OBSERVATIONS, AND NWP OUTPUT IN THE AUTOMATED STREAM FLOW  
FORECASTING**

*Рассмотрены ключевые аспекты технологии комплексного использования данных спутниковых, радарных и наземных наблюдений, а также выходных данных гидродинамических моделей погоды, позволяющей повышать точность и увеличивать заблаговременность прогнозов речного стока, выпускаемых в автоматизированном режиме, за счет повышения пространственно-временной дискретности наземных наблюдений за осадками. Особое внимание уделено особенностям использования радарных наблюдений за осадками в гидрологическом прогнозировании.*

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутник, метеорологический радар, датчик, гидрологическое моделирование, автоматическое прогнозирование стока, пространственно-временная дискретность наблюдений, осадки, усвоение данных.*

*Key aspects of a technique of the integrated usage of remotely sensed satellite and radar data, in situ data, and NWP output data are considered. This approach allows proving accuracy and extending lead time of the stream flow forecasts based on enhanced spatiotemporal resolution of surface (in situ) observations. Special attention is paid to peculiarities of applying radar data in hydrologic prediction.*

*Key words: remote sensing, satellite, weather radar, sensor, hydrologic modeling, automated runoff forecasting, spatiotemporal resolution of observations, precipitation, data assimilation.*

**Общие сведения**

Российская Федерация, к сожалению, до сих пор отличается сравнительно низкой пространственно-временной дискретностью наземных метеорологических наблюдений. Сеть наземных наблюдений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета) не соответствует современным требованиям по информационному обеспечению экономики страны и безопасности населения. В 1990-е годы количество постов, имеющих в распоряжении Росгидромета, сократилось более чем на 30 %. При этом 85 % средств наблюдений выработали свои 2-3-кратные сроки эксплуатации. К 2020 г. Росгидромет планирует открытие новых автоматических гидрологических комплексов, около 30 автоматизированных центров сбора информации, 8 аналитических лабораторий и т.д. [1], но это составляет менее 50 % от рекомендованного Всемирной Метеорологической Организацией

(ВМО) уровня [2, 3]. По численности средств дистанционного зондирования атмосферы и гидросферы РФ уступает США (в среднем в 12 раз), Японии (в 28 раз), Австралии (в 17 раз) и Западной Европе (в 15 раз). Средняя плотность наземных гидрометеорологических наблюдений в РФ составляет 1 пост на 10,5 тыс. км<sup>2</sup>, что в 3 раза ниже рекомендованного ВМО уровня и в 70 раз меньше плотности наблюдений в Великобритании (где плотность наблюдений считается достаточной для моделирования опасных гидрометеорологических явлений).

Применяемые в стране технологии контроля, мониторинга и прогнозирования экологических и гидрометеорологических процессов и явлений нуждаются в безотлагательном обновлении научно-технической и технологической базы. В частности, необходимо срочное воссоздание отечественной космической метеорологической группировки, поскольку подписанное в 2006 г. соглашение между NOAA (США) и EUMETSAT (ЕС) подразумевает ограничение доступа третьих стран, включая и Россию, к оперативным данным метеонаблюдений из космоса[1].

К сожалению, подобная ситуация характерна и для сети радарных наблюдений за перемещением облачных масс и выпадением осадков из них, позволяющих обеспечивать «вход» прогностических гидрологических моделей с распределенными параметрами с пространственной дискретностью менее 1 км и временной – в несколько минут. В частности, число ныне применяемых в РФ метеорадаров почти вдвое меньше, чем число радаров, успешно используемых для целей оперативного гидрологического прогнозирования в меньшей по площади Австралии (рисунок 1) [4, 5].

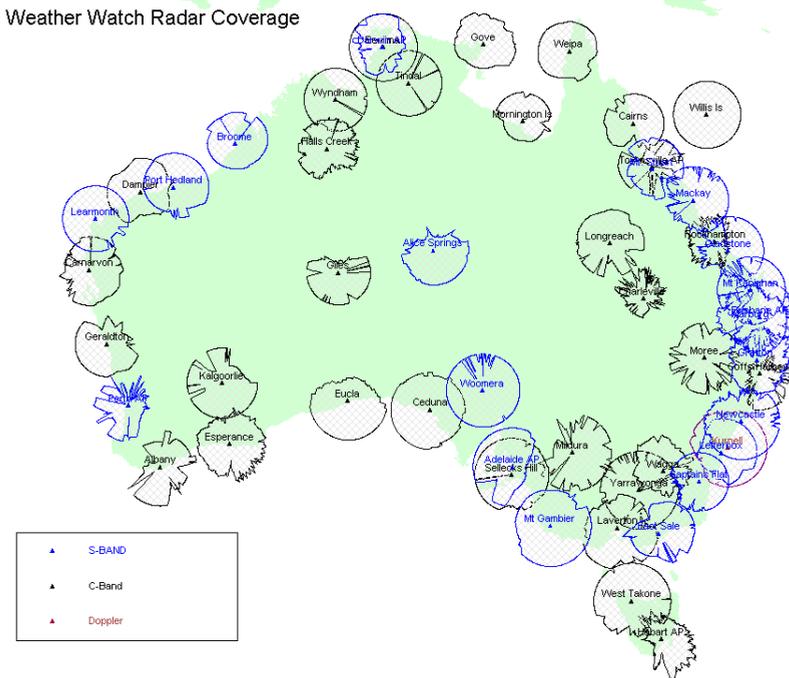


Рис. 1 – Схема расположения метеорадаров в Австралии [4]

Важно подчеркнуть, что сама по себе закупка и установка радаров не решает проблемы обеспечения качественного «входа» гидрологических моделей, используемых в автоматизированных системах прогнозирования (АСП) стока. Для этого, помимо программного обеспечения, поставляемого вместе с радаром, необходимо обеспечить эффективное функционирование подсистем усвоения радарных данных, их обработки и архивирования, цифровой модели рельефа для рассматриваемого водосбора, а также подсистемы параметризации (калибровки) гидрологических моделей для всех его пикселей или элементарных водосборов [4, 5], а также ряд вспомогательных технологических процессов, обеспечивающих взаимодействие всех подсистем АСП.

Современные технологии дистанционного зондирования (ДЗ) открывают широкие возможности для повышения точности и заблаговременности прогнозов речного стока [1-8]. Данные ДЗ не заменяют наземных наблюдений, но позволяют решать новые задачи в области гидрологического прогнозирования. В частности, данные спутниковых, авиационных или радарных наблюдений можно использовать для повышения пространственно-временной дискретности гидрометеорологических наблюдений. Кроме того, весьма перспективным представляется комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и «выхода» гидродинамических моделей погоды, позволяющее значительно повысить точность и заблаговременность прогнозов стока, что особенно важно для регионов с низкой пространственно-временной дискретностью наземных наблюдений [2-5].

На наш взгляд, наиболее интересными с точки зрения дальнейшего развития технологий автоматизированного гидрологического прогнозирования представляются следующие информационные и научно-технические продукты:

- спутниковые данные о перемещении облачных полей и типе облаков, получаемые в видимом диапазоне, позволяющие оценить риск выпадения сильных осадков [9];
- данные спутникового микроволнового зондирования о размерах дождевых капель или частиц льда на верхней поверхности облаков, позволяющие оценить интенсивность ожидаемых осадков [10];
- спутниковые данные о протяженности снежного покрова, получаемые в видимом диапазоне и позволяющие оценить динамику снеготаяния, что важно при прогнозировании весенних половодий [2];
- методы стыковки гидродинамических моделей погоды и данных спутникового зондирования, позволяющие повысить заблаговременность фонового прогнозирования стока до 10 суток [4, 5, 11, 12];
- данные спутникового зондирования почвенной влаги, которые можно использовать для оценивания рисков лесных пожаров, засух и наводнений [13];
- спутниковые данные о слое выпавших осадков (в качестве примера можно привести данные об осадках, полученные при помощи датчика «SpecialSensorMicrowaveImager» (SSM/I), используемого в рамках программы DMSP американского военного ведомства с пространственным разрешением 1,25 градуса);
- данные об интенсивности и объеме (слое) выпавших осадков в радиусе около 200 км, получаемые с наземных радаров с дискретностью 10 минут и позволяющие значительно расширить возможности наукастинга [12];

- разнообразные датчики, позволяющие проводить автоматические метеорологические наблюдения [14];
- методы автоматической передачи, обработки и архивирования данных [2, 5]
- методы текущей рекалибровки и постобработки прогнозов в режиме, близком к реальному времени [15] и др.

Список не упомянутых здесь метеорологических данных, используемых при прогнозировании речного стока в автоматизированном режиме, представлен в таблице 1. Наиболее важные гидрологические данные, получаемые при помощи спутникового зондирования, представлены в таблице 2. В таблице 3 представлены виды (диапазоны) дистанционного зондирования, применяемые для определения влажности верхнего слоя почвы; такие данные исключительно важны для оценивания предшествующего увлажнения при прогнозировании паводков и половодий.

Очевидно, что современные технологии сбора, передачи, обработки и архивирования данных дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли, наземных наблюдений и выходных данных моделей погоды, равно как и имеющиеся процессорные ресурсы, значительно упрощают процедуру прогнозирования стока и позволяют за короткий срок выпускать прогнозы для большого числа водосборов в полностью или частично автоматизированном режиме.

Данная работа, продолжает серию публикаций по автоматизированному прогнозированию стока. Она посвящена одной из важнейших составляющих комплексного использования данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и «выхода» гидродинамических моделей погоды для автоматизированного прогнозирования речного стока при помощи АСП – использованию радарных данных об осадках, поскольку этот вид информации в настоящее время в оперативной деятельности прогностических подразделений Росгидромета практически не используется [1] или используется в предэксплуатационном режиме. В последующих публикациях будут рассмотрены вопросы, связанные с использованием спутниковых данных и данных, получаемых с автоматических датчиков, при автоматизированном прогнозировании стока.

### **Радарные наблюдения за осадками**

#### **Факторы, влияющие на точность радарных наблюдений**

Метеорологические радары позволяют проводить наблюдения за местоположением и передвижением облачных полей, вызывающих осадки. Кроме того, с их помощью можно получать данные об интенсивности и объеме (слое) осадков [6, 8, 9, 11]. При использовании радара для гидрологических целей эффективная дальность его действия обычно составляет 40–200 км [2, 4, 5, 8, 9] в зависимости от таких характеристик радиолокатора, как излучение антенны, выходная мощность, чувствительность приемника. Гидрологической дальностью радара считается максимальная дальность, на которой связь между интенсивностью отраженного излучения и интенсивностью дождя остается обоснованной. Эффект ослабления луча наиболее сильно проявляется при использовании коротковолновых радаров, однако длинноволновые радары обнаруживают слабый дождь или снег менее эффективно. Для наблюдений за осадками применяют доплеровские радары, а также радары, работающие в Si C-диапазонах [2, 5]. Рассмотрим основные факторы, определяющие точность радарных наблюдений [2, 5, 6, 8].

- *Длина волны.* Применение S-диапазона, как это делается в США, устраняет проблемы, связанные с ослаблением радиолокационного сигнала при прохождении его через осадки. Применение C-диапазона приводит не только к повышению чувствительности, но и к возникновению проблемы ослабления сигнала. Кроме того, C-диапазонные системы почти в 2 раза дешевле, чем S-диапазонные при тех же эксплуатационных характеристиках.
- *Помехи от земной поверхности.* Радиолокационный луч может сталкиваться с различными объектами на поверхности земли. Помехи можно ошибочно принять за осадки. Радары обычно располагаются таким образом, чтобы уменьшить эхо от объектов, но полностью избежать его невозможно, поэтому для учета помех следует использовать, например, обработку доплеровских сигналов с перемещением карты помех.
- *Ширина и дальность распространения радиолокационного луча.* На расстоянии 100-160 км ширина радиолуча может достигать нескольких километров. Поэтому получают не единичное значение наблюдаемого элемента в точке, а значение, усредненное для большого пространственного объема. Важно подчеркнуть, что пространственное распределение дождя, получаемое с помощью радара, обычно более точно передает конфигурацию изогий ливня, чем данные наземных наблюдений [2, 8].

Таблица 1

Метеорологические данные, необходимые для прогнозирования стока в автоматизированном режиме

Вид данных	Задержка	Пространственная дискретность	Временная дискретность
Суточные осадки на водосборе	< 1ч	12,5 км	1 ч
Минимальная и максимальная температура воздуха за сутки	< 1ч	12,5 км	1 ч
Метеоданные с автоматических станций (температура воздуха, скорость и направление ветра, влажность воздуха)	< 1ч	Точечные данные	1ч или 1 мин
Выходные данные гидродинамических моделей (осадки, испарение, интенсивность снеготаяния, температура воздуха, скорость и направление ветра, влажность воздуха)	< 1ч	12,5 км	1 ч
Индекс NDVI	< 24 ч	1км	7 сут
Атмосферное давление на поверхности Земли	< 1ч	12,5 км	1 ч
Температура на поверхности Земли	< 1ч	12,5 км	1 ч
Скорость и направление ветра для каждого пикселя или элементарного водосбора	< 1ч	12,5 км	1 ч
Точка росы	< 1ч	12,5 км	1 ч
Испаряемость	< 1ч	12,5 км	1 ч
Облачность	< 1ч	12,5 км	1 ч

Продолжение таблицы 1

Вид данных	Задержка	Пространственная дискретность	Временная дискретность
Длинноволновая нисходящая радиация	< 1ч	12,5 км	1 ч
Коротковолновая нисходящая радиация	< 1ч	12,5 км	1 ч
Радарные данные о слое осадков, выпавших на водосбор за последний час	15мин	1 км	1 ч

- *Атмосферное и антенное ослабление сигнала.* Микроволны ослабляются в атмосферных газах, облаках и осадках. Ослабление радиоволн является результатом действия двух факторов – поглощения и рассеивания. Для радаров, работающих на более длинных волнах, ослаблением можно пренебречь.
- *Преломление и множественное рассеяние радиолокационного луча.* Радиолокационные волны проходят через пространство, обладающее эффектом преломления, который обуславливает криволинейность их траектории. Средний радиус их кривизны составляет примерно 4/3 среднего радиуса Земли. Вследствие неравномерного распределения влаги по вертикали может произойти добавочное рефракционное искривление радиолуча. В результате возникает явление, которое часто называют явлением волновода или захвата радиолокационного луча; оно либо вызывает обратное искривление луча в сторону земной поверхности, либо искривляет луч вверх, причем захватываются осадки на расстоянии 80–120 км [2].

Таблица 2

Гидрологические данные, получаемые при помощи спутникового зондирования [5]

Гидрологическая характеристика	Вид зондирования	Частота определения	Spatial Resolution
Влажность верхнего слоя почвы (2-5 см)	Пассивное микроволновое	1-3 сут	50 км
	Активное микроволновое	3 сут, 30 сут	3 км, 10 м
	Тепловое инфракрасное	1 ч, 1 сут, 15 сут	60 м, 1 км, 4 км
Температура подстилающей поверхности	Тепловое инфракрасное	1 ч, 1 сут, 15 сут	60 м, 1 км, 4 км
Протяженность снежного покрова	Видимое / Тепловое инфракрасное	1 ч, 1 сут, 15 сут	30-60 м, 500 м-1 км, 4 км
Водный эквивалент снега	Пассивное микроволновое	1-3 сут	50 км
Водный эквивалент снега	Активное микроволновое	3 сут, 30 сут	10 м
Изменение запаса воды в водохранилище	Изменение гравитации	30 сут	1,000 км
Полное испарение	Тепловое инфракрасное	1 ч, 1 сут, 15 сут	60 м, 1 км, 4 км

- *Вертикальная скорость.* Вертикальная скорость осадков в системах с глубокой конвекцией может обусловить появление радиолокационного эхо, которое, в свою очередь, может привести к искажению соотношения между количеством осадков  $R$  и отражаемостью  $Z$  по сравнению со значением, определенном для спокойного воздуха. При нисходящих движениях воздуха со скоростью 8 м/с значение отражаемости при данной интенсивности осадков может быть приблизительно на 3 дБ меньше, чем в спокойном воздухе, что приводит к занижению интенсивности осадков на 40%.
- *Вертикальный профиль отражаемости.* Главный фактор, вызывающий смещение радиолокационных оценок осадков, — это геометрические параметры вертикальных измерений метеорологических радаров. При увеличении расстояния радиолокационные измерения производятся на возрастающей высоте над земной поверхностью, поэтому радиолокационные измерения отражаемости в воздухе могут быть точными, но нерепрезентативными для условий вблизи от поверхности.
- *Снег и град.* Метеорадар способен измерять снегопад так же точно, как и дождь. Наличие града способны непосредственно распознавать лишь поляризационные радары (за исключением одинарного поляризационного).
- *Технология сканирования.* Для всех коммерческих радаров является стандартом конструкция электронного радиолокационного цифрового преобразователя, способного отбирать эхо-сигналы в количестве 80 приращений дальности на каждые  $2^\circ$  азимута. Время, необходимое на выборку и запись всей радиолокационной развертки, составляет от 1 до 4 минут, а количество слоев по высоте — от 8 до 14. Выбранная стратегия сканирования зависит от цели использования радиолокационных данных. Могут применяться два типа стратегии сканирования: сплошной и чередующийся. При сплошном сканировании радиолокационный луч быстро пробегает через всю высоту, после чего процедура повторяется. При чередующемся сканировании каждая последующая высота луча пропускается при первой последовательности сканирования, а пропущенные высоты исследуются во время второй очереди сканирования, которая следует сразу за первой. Радар с одинарной поляризацией можно использовать для измерения количества суточных осадков с точностью близкой к 10%. Такой уровень точности близок к тому, который обеспечивается осадкомером. Однако измерение количества осадков за промежуток времени менее суток более проблематичен — особенно, при использовании **С-диапазона** и более коротких волн, которым свойственно ослабление радиолокационного сигнала при конвективных осадках, что является серьезной проблемой. Часовые осадки из слоистых облаков над водосбором площадью около 100 км<sup>2</sup> можно измерить со средней точностью 20%, а сильные конвективные — с точностью 40% [2]. Такой точности радарных данных достаточно для фоновое прогнозирование стока, а для уточненного прогнозирование они должны пройти процедуру ассимиляции с использованием данных наземных наблюдений [14]. Более подробно проблема использования радарных данных для моделирования стока рассмотрена ниже.

## Краткий обзор некоторых технологий в области радарных измерений осадков

*Доплеровские радары (ДР).* Для мгновенного измерения абсолютной скорости движения дождевых капель и направления их движения необходимо использовать радиолокационную установку с очень точной частотой передающего устройства и с приемной системой, чувствительной к изменению частоты в результате передвижения цели. Радары подобного типа называют когерентными или Доплеровскими, поскольку они используют широко известный эффект Доплера. ДР играют важную роль в исследовании атмосферы, однако до сих пор полностью не решена проблема интерпретации данных, поэтому данные, получаемые при помощи ДР, редко используются в оперативных прогностических системах. Кроме того, ДР значительно дороже традиционных радаров, требуют более высокой вычислительной мощности для обработки данных, а их эксплуатация значительно сложнее [2].

*Многофункциональные исследовательские радары.* Развитие аппаратного обеспечения многопараметрических радаров, с помощью которого измеряются свойства гидрометеоров, шло медленно, начиная с производства высокоскоростных переключателей, позволяющих осуществлять поочередную передачу вертикально и горизонтально поляризованного микроволнового излучения. Однако в последние годы ученые стали активно работать над другими видами поляризации, например, такими, как круговая, а также над изучением возможностей многопараметрических радаров для измерения осадков и разработкой аппаратного обеспечения. Многофункциональные исследовательские радары, например, CSU-CHILL, установленные в США и «Chilbolton» в Великобритании, позволили получить систему отладки, при помощи которой можно решить, какая основа поляризации наиболее эффективна, и выбрать тип гидрометеора.

*Наземные радары* используются более 20 лет, в большинстве случаев вместе с сетями дождемеров, которые используются для их калибровки. Оценки осадков, полученные с помощью радаров, более полезны, чем полученные осадкомером, поскольку они непрерывны во времени и пространстве и отражают площадь охвата. Но с их использованием связаны такие проблемы, как обратное рассеяние, ослабление, поглощение сигнала и помехи при его передаче. Особенно они проявляются в районах со сложными рельефом и, следовательно, сложными условиями калибровки сигнала. Радары широко используются как неофициальные средства первоначального предупреждения о приближающемся наводнении, использующие двигающиеся изображения, полученные с помощью штормовой системы, и лишь в нескольких странах мира полученные таким образом данные используются при оперативном прогнозировании стока [15]. Развитие прогностических моделей с распределенными параметрами (разработанных специально для использования радарных данных) в большинстве стран все еще находится на стадии разработки [2]. Возможность выпуска таких прогнозов в режиме реального времени или близком к реальному времени должна быть подтверждена путем оценивания эффективности такого подхода по сравнению с действующими моделями (с сосредоточенными параметрами).

В заключение отметим, что наибольших успехов в области оперативного прогнозирования стока и оценивания рисков наводнений на основе радарных данных об осадках добились США, Япония, Австралия, Румыния, а также Великобритания, Франция и другие западноевропейские страны.

**Виды (диапазоны) дистанционного зондирования, применяемые для определения влажности верхнего слоя почвы**

Диапазон ДЗ	Переменная	Достоинства	Недостатки	Источники шумов	Датчики
Видимый	Альbedo почвы	Простота, хорошее покрытие	Множество источников шумов	Двумерная функция распределения отражательной способности объектов, облачность, цвет почвы, растительность	AVHRR MODIS Landsat SPOT
Коротковолновый инфракрасный	Влажность почвы и растительности	Очень чувствителен по отношению к влажности почвы	Существенное влияние сигнала, отражающего влажность почвы	Облачность, растительный покров	MODIS ASTER
Тепловой инфракрасный	Температура поверхности	Высокое разрешение, широкая полоса захвата, хорошее покрытие, высокая частота наблюдений, физическая реалистичность	Ширина покрытия и частота наблюдений ограничены облачностью	Метеоусловия	IR-MSS AVHRR MODIS
Активный микроволновый	Коэффициент обратного рассеяния, диэлектрические характеристики	Низкий уровень атмосферных шумов, высокое разрешение	Ограниченная полоса захвата	Шероховатость и рельеф поверхности Земли, растительный покров	ERS-Scatterometer
Пассивный микроволновый	Яркость, температура почвы, диэлектрические характеристики	Низкий уровень атмосферных шумов, высокая проникаемость через слой растительности	Низкое разрешение, подверженность радиопомехам	Шероховатость поверхности Земли, растительность, температура, средства связи	SMMR AMSR-E SMOS Hydros

Обозначения датчиков:

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

MODIS – MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

Landsat – программаспутниковыхнаблюдений, проводимаяNASAиUSGS

SPOT – французская программа спутникового зондирования Земли

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

IR-MSS – Infrared Multispectral Scanner

ERS-Scatterometer – европейский радар, работающий в С-диапазоне с пространственным разрешением около 50 км

SMMR – scanning multichannel microwave radiometer

AMSR-E – Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth observing system

SMOS – SoilMoistureandOceanSalinity (европейская программа спутникового зондирования Земли)

Hydros – HYDROsphere State mission (программа NASA по спутниковому зондированию Земли)

### **Особенности применения радарных данных при автоматизированном прогнозировании стока**

Некоторый опыт применения радарных данных для оперативного прогнозирования стока накоплен лишь в нескольких странах. На наш взгляд, наиболее интересные исследования в этой области выполнены американскими учеными, которые заключались в сопоставлении радарных данных об осадках с данными наземных наблюдений, получаемых на территории штата Оклахома с пространственной дискретностью 1 км (Oklahoma Mesonet). Эти исследования позволили перейти к использованию радарных данных для оперативного прогнозирования стока на основе модели «Сакраменто» с распределенными параметрами с временной дискретностью 1 час [7, 8].

В общем случае для автоматизированного прогнозирования стока на основе комплексного использования данных дистанционного зондирования (в частности, радарных), наземных наблюдений и «выхода» гидродинамических моделей погоды необходимо решить следующие задачи:

1. Обеспечение аппаратных и программных средств автоматической передачи, обработки и архивирования (в программно-реализованной базе данных) разнородных данных в режиме, близком к реальному времени, включая их усвоение, контроль качества, корректировку и ремасштабирование (приведение к единой пространственно-временной дискретности), а также протоколирование всех операций по преобразованию данных [2, 5, 14] и передачу окончательных массивов данных в АСП;
2. Обеспечение автоматической делинеации элементарных водосборов по цифровой модели рельефа в соответствии с установленной пространственно-временной дискретностью обработанных данных [2, 5];
3. Организацию автоматической калибровки гидрологических моделей с распределенными параметрами для каждого пикселя расчетной сетки или элементарного водосбора [15]. Важно подчеркнуть, что калибровка моделей с распределенными параметрами требует больших процессорных ресурсов и большего времени, чем калибровка моделей с сосредоточенными параметрами, поэтому применяемый метод калибровки должен быть экономичен с точки зрения использования процессорных ресурсов. Возможные способы калибровки моделей с распределенными параметрами будут рассмотрены в одной из последующих статей данного цикла;
4. Обеспечение стыковки различных метеорологических и гидрологических прогностических моделей [2, 5] с учетом установленной пространственно-временной дискретности;

5. Обеспечение индивидуального подхода к форме представления выпускаемых прогнозов (в зависимости от потребностей и пожеланий их потребителя). Способ представления прогнозов должен включать автоматическую идентификацию источников, типов и характеристик данных, использованных при выпуске каждого конкретного прогноза [2]. Это необходимо для того, чтобы потребитель мог самостоятельно судить о надежности прогнозируемых величин.

В заключение подчеркнем, что уровень автоматизации разрабатываемых в РФ и других странах технологий гидрологического прогнозирования неуклонно повышается, поэтому комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и «выхода» гидродинамических моделей погоды требует самого пристального внимания и дальнейшего развития. Этот подход обеспечивает непрерывность, высокую пространственно-временную дискретность и качество «выхода» гидрологических моделей и, следовательно, позволяет повысить точность и заблаговременность прогнозов стока, что особенно важно для регионов с низкой пространственно-временной дискретностью наземных наблюдений [2, 4, 5].

Как показывает опыт, приобретение и внедрение зарубежных технологий (включая рекомендованные ВМО) требует привлечения значительных ресурсов, но при этом не гарантирует успешного решения задачи модернизации и повышения эффективности работы гидрометеорологической службы [1]. Именно по этой причине перед нами стоит задача разработки всех элементов с учетом не только мировых трендов, но и экономических, физико-географических, информационных и социально-политических особенностей Российской Федерации, СНГ и других стран, заинтересованных во внедрении работоспособных прогностических систем. Только в этом случае мы сможем не только повысить эффективность гидрометеорологического обеспечения экономики нашей страны, но и усилить ее позиции на мировом рынке наукоемких гидрометеорологических технологий.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П1103 от 02 июня 2010 г.) по направлению «География и гидрология суши».

### Литература

1. Стратегия деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года (с учетом аспектов изменения климата). Материалы VI Метеорологического съезда, Санкт-Петербург, 2009 г., 77 с.
2. Guide to Hydrological Practices, Volume I, Hydrology – From Measurement to Hydrological Information, WMO-№ 168, Sixth edition, 2008.
3. World Meteorological Organization, 1983: Guide to Climatological Practices. Second edition, WMO-№ 100, Geneva.
4. V. Kuzmin, A. Seed, J. Walker. Australian Government Bureau of Meteorology forecast and real-time observational hydrometeorological data for hydrologic forecasting // eWater CRC Technical Report, eWater CRC, Canberra, 2007.
5. D. Barrett, V. Kuzmin, J. Walker, T. McVicar, C. Draper. Improved stream flow forecasting by coupling satellite observations, in situ data and catchment models using data assimilation methods // eWater CRC Technical Report, 2008, 77 p.
6. Chumchean, S., A.W. Seed, and A. Sharma, 2006. An Integrated Approach to Error Correction for Real-Time Radar-Rainfall Estimation. J. Atmos. and Oceanic Tech., 23(1), 67–79.

7. *M. Smith, V. Koren, Z. Zhang, S. Reed, D.-J. Seo, F. Moreda, V. Kuzmin, Z. Cui, R. Anderson.* NOAA/NWS Distributed Hydrologic Modeling Research and Development // NOAA Technical Report NWS 45, April, 2004.
8. *Z. Zhang, M. Smith, V. Koren, S. Reed, F. Moreda, V. Kuzmin, R. Anderson.* A study of the relationship between rainfall variability and the improvement of using a distributed model // Eds. Y. Chen, K. Takara, I. D. Cluckie, H. F. de Smedt, GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment, IAHS Publ. No. 289, 2004.
9. *Ebert, E.E. and Weymouth, G.T.,* 1999, Incorporating Satellite Observations of “NoRain” in an Australian Daily Rainfall Analysis, *J. Appl. Meteor.*, 38, 1, 44-56.
10. *Rosenfeld, D., and G. Gutman,* 1994: Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multi spectral analysis of AVHRR data. *Atmos. Res.*, 34, 259-283.
11. *Herman, A., V. Kumar, P. Arkin, and J. Kousky,* 1997, Objectively determined 10-day African rainfall estimates created for famine early warning systems, *International Journal of Remote Sensing*, v. 18, n. 10, 2147-2159.
12. *Wagner, W; Naeimi, V; Scipal, K; de Jeu, R; Martinez-Fernandez, J* (2007), Soil moisture from operational meteorological satellites/ *Hydrogeology Journal*, 15 (1): 121-131.
13. *D'Souza, G., Barrett, E. C. & Power, C. H.* (1990) Satellite rainfall estimation techniques using visible and infrared imagery. *Remote Sens. Rev.* 4(2), 379-410.
14. World Meteorological Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985: Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management. WMO-No. 634, Geneva.
15. *Kuzmin, V., Seo, D.-J., Koren, V.* Fast and efficient optimization of hydrologic model parameters using a priori estimates and stepwise line search // *Journal of Hydrology*, vol. 353, iss. 1–2, 2008, pp. 109–128.

*В.А. Кузьмин, А.Г. Сурков, К.В. Шеманаев*

### **ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОКА**

*V.A. Kuzmin, A.G. Surkov, K.V. Shemanaev*

### **PRINCIPLES OF AUTOMATIC DATA PROCESSING IN AUTOMATED STREAMFLOW FORECASTING SYSTEMS**

*Рассмотрены основные принципы полностью автоматизированной обработки данных гидрометеорологических наблюдений, используемых для прогнозирования речного стока автоматизированными системами. Методические отличия между автоматической и «ручной» обработкой данных показаны с учетом рекомендаций ВМО и международных стандартов. Показаны возможные пути развития автоматизированных систем прогнозирования различных геофизических процессов и явлений в Российской Федерации.*

*Ключевые слова: речной сток, автоматизированное прогнозирование, прогностическая система, автоматическая обработка данных*

*Basic principles of fully automated processing of hydrometeorological data used in automated streamflow forecasting systems are considered. Presented methodological differences between automatic and manual data processing are based on WMO recommendations and international standards. Possible ways of further development of automated forecasting geophysical systems in the Russian Federation are shown.*

*Key words: river runoff, automatic forecasting, forecasting system, automatic data processing.*

#### **Общие положения**

В настоящее время Российским государственным гидрометеорологическим университетом выполняется целый ряд научно-исследовательских работ, подразумевающих разработку автоматизированных систем прогнозирования (АСП) различных гидрологических и метеорологических процессов и явлений.

Для последующего внедрения и дальнейшей коммерциализации разрабатываемых АСП необходимо обеспечить научно и технически обоснованные гарантии качества, главным образом основанные на соблюдении установленных стандартов в организации функционирования и взаимодействия всех подсистем АСП [1-3], включая подсистему контроля качества и обработки поступающих данных автоматических гидрометеорологических измерений, являющуюся важнейшим элементом любой АСП. В то же время, в связи с тем, что автоматизированные системы гидрологического прогнозирования во всем мире разрабатываются и внедряются лишь со второй половины 70-х годов прошлого века, национальными гидрометеорологическими службами до сих пор практически не разрабатывались и, следовательно, не используются единые стандарты полностью автоматизированной обработки данных.

Во многих случаях используются регламентированные действующими нормативными документами принципы и методы контроля качества и обработки данных, применяемые персоналом прогностических подразделений либо в «ручном», либо в полуавтоматическом режиме (то есть, под контролем оператора).

Полностью автоматизированное (например, фоновое) прогнозирование речного стока подразумевает появление человека лишь на заключительном этапе, когда автоматически выпущенный прогноз (в любой форме, например, в виде карты зон повышенного риска наводнения), построенный на основе автоматически собранных и обработанных данных, появляется перед лицом, ответственным за принятие решения на его основе. Многих привычных этапов процедуры сбора и обработки данных теперь не существует; исчезли бумажные журналы наблюдений; компьютерное архивирование данных автоматических измерений стало стандартной практикой в большинстве стран, поэтому обработка данных подразумевает их автоматическое конвертирование в нужный формат на раннем этапе (например, в момент, когда измерения поступают в электронный преобразователь, накопитель или логгер).

Именно поэтому в данной статье рассматриваются, в первую очередь, наиболее важные и принципиальные различия между автоматическими и традиционными способами контроля качества и обработки данных, определяющие специфику автоматизированного прогнозирования стока и других гидрологических процессов и явлений. Основной акцент сделан на описании ключевых принципов автоматической обработки данных с учетом рекомендаций Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) и международных стандартов [1-6]; описание конкретных математических процедур вынесено за рамки данной статьи и будет представлено в последующих публикациях по автоматизированному прогнозированию стока.

В современных АСП данные собираются при помощи разнообразных автоматизированных средств сбора и передачи информации. Затем они должны пройти автоматический контроль качества, в результате которого эти данные могут быть автоматически откорректированы. В этом случае все внесенные изменения должны быть запротоколированы. Важно подчеркнуть, что обеспечению гарантии качества прогнозирования способствует внедрение наиболее передовых и прошедших достаточную апробацию методов проверки поступающих данных. Для этой цели ВМО рекомендует [4] национальным гидрологическим службам (при наличии необходимых ресурсов) рассмотреть возможность принятия программы управления качеством в виде, описанной, например, в [1].

Согласно [4], при традиционном сборе, обработке и использовании данных должны применяться подходы, прошедшие достаточную апробацию в оперативной деятельности прогностических подразделений национальных гидрометслужб. Гидролог обязан быть консервативным при проведении корректировки данных и выносить решение о необходимости изменений или добавлений только на основе строгих формальных критериев, основанных, скорее, на доказательствах, чем на предположениях. Если сделано то или иное предположение, оно остается в рамках ответственности пользователя, поскольку вся необходимая для этого информация может быть у него под рукой (например, в виде примечаний в полевом журнале или комментариев, хранящихся отдельно от базы данных). При автоматической обработке данных места

для субъективных предположений нет вообще: какое бы то ни было вмешательство в массив поступивших данных допустимо только на основе формальных критериев, установленных разработчиком АСП. Каждое изменение в данных должно быть записано таким образом, чтобы при необходимости можно было бы понять, что именно было сделано и почему. Для этой цели необходимо и достаточно иметь автоматически заполняемый журнал задокументированных процедур, с помощью которого можно будет проследить и проверить процесс работы с данными. Это условие тоже является требованием системы контроля качества разрабатываемых АСП.

Система контроля качества может включать те или иные механизмы (математические процедуры) корректировки входящих данных, выбор которых всецело зависит от научных пристрастий разработчика АСП. Однако они, тем не менее, должны соответствовать международным стандартам, подробно описанными в «Руководстве по климатологическим методам» [5]. При разработке стандартов данных, целесообразно учитывать разрешение (дискретность, цену деления и т.п.) измерительных приборов, точность измерения физической величины, погрешность результата измерения и интегральную неопределенность измерительной процедуры [6]. Важно подчеркнуть, что уровень допустимой неопределенности обычно рассматривается в первую очередь. Как только он установлен, должны быть рассмотрены уровни неопределенности используемых методов, технологий и инструментов. Кроме того, в качестве формального критерия качества данных целесообразно использовать характеристики их полноты, от которой зависит полезность данных. Так, например, при разработке автоматической процедуры контроля качества необходимо определить разумные параметры ожидаемой полноты данных в виде, например, допустимого процентного соотношения пропущенных наблюдений. Это принцип может и должен быть положен в основу оптимизации автоматической наблюдательной сети, что позволит избежать необходимости заполнять пропуски предполагаемыми (в частности, интерполированными) значениями.

### **Первичная обработка данных**

Первичная обработка заключается в подготовке данных к хранению в автоматической программно-реализованной базе данных (БД), в котором они будут доступны для использования в течение среднего или долгого срока. В зависимости от типа данных, первичная обработка может включать обработку графиков (например, графиков хода уровней воды, полученных с электронных самописцев) или обычную передачу файлов с незначительным редактированием или вообще без редактирования, в том виде, в котором эти данные получены с регистрирующего устройства (преобразователя или накопителя данных). Данные могут быть использованы и до такой обработки (например, данные о дистанционно измеренных уровнях воды), однако, конечный пользователь прогностической информации должен быть предупрежден, что данные не проверены и могут содержать ошибки. Рассмотрим основные элементы первичной автоматической обработки данных [4], которая должна выполняться при формировании непрерывных входных массивов прогностических моделей, используемых в АСП.

1. Предварительная проверка данных. Разница между предварительной проверкой и обнаружением ошибки довольно произвольная. Процедуры, которые в одной стра-

не считаются предварительной проверкой, в другой могут считаться обнаружением ошибки. Кроме того, степень использования компьютера при обработке данных может изменить понятие предварительной проверки. Для данных, собранных вручную, а затем переведенных в компьютерные файлы, термин «предварительная проверка» используется для обозначения процедур, предшествующих переводу данных в форму, пригодную для машинного считывания. Для данных, непосредственно собираемых в цифровой форме, требуется лишь незначительная проверка, которая отличается от обычного сравнения полученного массива данных с записями, выполненными вручную. Для телеметрических цифровых данных, предварительный контроль может быть незначительным или вообще не требоваться перед тем, как эти данные будут переданы пользователю или размещены в ассоциированной с АСП базой данных. В таких ситуациях пользователь должен быть предупрежден о том, что предоставленные данные являются непроверенными, и их следует использовать соответствующим образом. Даже в тех случаях, когда используется автоматическая процедура проверки данных, выполняется проверка лишь некоторых свойств данных (например, размаха, выбросов, шага, отсутствие некорректных символов или недостающих значений), поэтому пользователь должен знать ограничения и возможности применяемого способа предварительной проверки. Обычно телеметрические данные заносятся в файлы на станции или в другом безопасном месте системы сбора и обработки данных. Они могут быть отредактированы и обрести статус архивных или проверенных данных только после прохождения полного набора предварительных проверок (как это было описано ранее для регистрирующего устройства), процедуры обнаружения ошибок и тестирования.

2. Прослеживаемость и обработка. Система автоматической обработки данных в АСП должна обеспечивать:
  - Регистрацию данных после их сбора с целью подтверждения их существования и отслеживания их обработки;
  - Хранение резервных копий данных в их оригинальной форме;
  - Непосредственная идентификация отдельных массивов данных на различных стадиях их обработки;
  - Сравнение текущего статуса данных с изначальным, и их тестирование с точки зрения пригодности для использования;
  - Представление и хранение сведений о любых изменениях данных;
  - Представление данных для проверки и контроля компетентными лицами, которые не имеют прямого отношения к процессу обработки данных.
3. Запись данных и отслеживание изменений в них. Данные, поступающие в АСП, должны быть зарегистрированы в автоматически заполняемом журнале, содержащем папки, которые систематизированы по типам станций или датчиков и представляют информацию в хронологическом порядке.
4. Идентификация и сохранение оригинальных записей. Все данные должны быть идентифицированы с использованием номеров станций, постов или датчиков и другими обязательными кодами. Для создания и хранения электронных данных необходимо иметь соответствующую систему наименования файлов и архив неизмененных оригинальных файлов данных. Рекомендуется видоизменить

имеющиеся файлы в надежный читаемый компьютером формат, который будет включать номера станций или датчиков и другие идентификаторы, чтобы в будущем не будет зависеть от программного обеспечения или средств, которые к тому времени устареют. Разработчикам АСП и БД (как являющихся частью АСП, так и автономных), рекомендуется обращать внимание на эту проблему при разработке и обновлении их файловых систем.

5. Преобразование данных с учетом автоматически идентифицированных ошибок. Такие ошибки могут быть обнаружены в результате сопоставления массива данных с массивами наблюдений на соседних автоматических станциях или постах или с данными наблюдений, полученными с соседних датчиков. Для корректировки таких ошибок БД должна автоматически выполнить необходимую корректировку на основе корреляции с данными наблюдений в соседних пунктах, или, в крайнем случае, при помощи линейной или более сложной интерполяции между зафиксированными значениями. Метод выполнения каждой корректировки должен быть отражен при помощи специальных кодов, используемых для протоколирования и документирования.
6. Накопление и интерполяция данных. Автоматические измерения многих переменных, в связи с их природной динамикой, должны проводиться в течение сравнительно короткого периода, даже если в будущем они будут использоваться только в виде усредненных или суммарных значений за довольно длительные периоды времени. Современные базы временных рядов имеют все возможности для эффективного получения, обработки и хранения данных с любым уровнем агрегации (например, в виде средних величин за час, сутки, месяц и год). Частоту измерений, выполняемых при помощи автоматических датчиков, следует устанавливать с учетом стохастических характеристик наблюдаемого процесса, так, чтобы при наличии небольших пропусков данные можно было бы восстановить путем интерполяции. Каждый факт пропуска данных целесообразно доводить до оператора АСП или лица, принимающего решение о проверке функционирования автоматических датчиков.
7. Вычисление производных переменных. Производные переменные – это те параметры, которые не измеряются непосредственно, а вычисляются с использованием других измерений (например, расход воды и испаряемость). Очевидно, что для данных, которые могут быть получены из основного фонда, не следует оставлять места для хранения в БД, поскольку оно ограничено.
8. Статус данных. Статус данных – это, как правило, автоматически определяемый код, обозначающий либо необходимость дополнительной обработки данных, либо отражающий полную готовность данных для дальнейшего использования в АСП. Например, автоматизированная система обработки данных Геологической службы США «ADAPS» имеет три уровня статуса: «рабочий», «находящийся на рассмотрении» и «одобренный». Системы БД, не имеющие таких опций, нуждаются во введении прав доступа к различным рабочим и архивным разделам, и другие привилегии, такие, например, как защита записей в файлах. Рекомендуется предоставлять право управления такой системой для каждой базы данных лишь одному человеку – например, системному администратору или специалисту, ответственному за контроль качества[4].

## Вторичная обработка данных

Вторичная обработка представляет собой комплекс процедур, необходимых для производства данных в конвертированной или сокращенной форме (например, определение суточного количества осадков для отдельного водосбора, полученное из пиксельных радарных данных об отдельных дождях). Кроме того, термин «вторичная обработка» покрывает вторичное редактирование, выполняемое после более сложной проверки, а также заполнение пробелов в записях. При вторичной обработке данных должны использоваться следующие принципы [4, 7]:

- Изменения не должны производиться, если предположения не обоснованы с научной точки зрения;
- Произведенные изменения должны сопровождаться комментариями, которые могут быть автоматически записаны в специальный файл внесенных исправлений в БД;
- Общее правило автоматического заполнения пробелов – не заполнять пропуски искусственными данными и не получать пропущенные значения путем интерполяции. Любые приблизительные данные должны сопровождаться ссылками на соответствующие комментарии в БД. Исключения из общего правила не использовать синтетические данные или данные, полученные методом интерполяции, приводятся ниже. Например, пробелы в записях данных об уровнях воды могут быть заполнены методом линейной или нелинейной интерполяции, если выполнены все последующие условия:
  - 1) Речной сток находится в состоянии равномерного естественного спада или отличается неизменным уровнем воды;
  - 2) Установлено, что в период времени, соответствующий пропуску в данных, на водосбор не выпадало существенного количества осадков;
  - 3) Известно, что естественный гидрологический режим рассматриваемого водосборане искажается никакими внешними факторами (например, электростанциями или ирригационными гидротехническими сооружениями);
  - 4) Имеется непрерывность данных на каждой стороне от пропуска;
  - 5) В некоторых ситуациях, соседняя станция или соседний датчик может измерять те же или почти те же данные. В первом случае запись может быть заполнена так, как если бы это была резервная запись. Во втором данные могут быть введены, если погрешность меньше стандартного отклонения или если корреляция между наблюдениями на этих станциях (а также соотношение амплитуд) составляет не менее 0,99. Комментарий, содержащий подробности этого соотношения должен быть записан в соответствующий файл в БД;
  - 6) Рассматриваемая станция не расположена на озере, на уровенный режим которого влияют сейши или ветровые сгонно-нагонные явления.
- Заполнение пробела в оригинальных данных искусственными данными, полученными при помощи корреляции, недопустимо. Они могут, однако, быть использованы в тех случаях, когда пользователь знает о существовании погрешности, а также в случаях, когда восстановленные данные используются в качестве «входа» прогностической модели, требующей непрерывности «входа», «выход»

которой подлежит дальнейшей постобработке. В таких случаях рекомендуется помечать значения, прогнозируемые при помощи АСП и основанные на различных данных (фактических, обработанных, восстановленных и т.д.) соответствующими символами или элементами цветовой палитры;

- Пробел в данных по осадкам может быть интерполирован только тогда, если может быть установлено, что осадков не было в течение этого периода, за счет корреляции с другими осадкомерами внутри и вне водосбора, для которых установлена корреляция с коэффициентом не ниже 0.99.

Если необходимо заполнить пропуски, время, потраченное на приблизительное оценивание ряда перед обработкой, может принести большие дивиденды после анализа и обработки конечной информации. Обычно предпринимается попытка пополнить недостающие данные путем перекрестной корреляции с близлежащими станциями, особенно, теми, которые находятся в той же речной системе. При отсутствии такой возможности, можно использовать модели типа «осадки—сток», включая использование концептуальных моделей водосбора (например, моделей «Сакраменто» и «MLCM»). Все рассчитанные данные следует соответствующим образом обозначать «флажками» и хранить в отдельном архиве БД, а прогнозы стока, выпущенные на их основе, должны быть помечены соответствующим образом. Это позволит пользователю АСП самостоятельно оценивать степень надежности выпускаемых прогнозов стока.

### **Валидация и контроль качества**

Процедуры валидации данных в общем случае заключаются в сравнении значений теста с исходными данными и часто присутствуют на нескольких уровнях первичной обработки, проверки данных и контроля качества. Несмотря на то, что методы компьютерного тестирования данных становятся более эффективными и мощными, следует понимать, что эта процедура никогда не будет автоматизирована до такой степени, что гидрологу не нужно будет проверять значения, помеченные флажками. В самом деле, для достижения лучшего результата пользователю АСП, возможно, придется постоянно изменять пороговые значения в программе. Кроме того, ему нужно будет регулярно принимать компетентное и взвешенное решение о том, принимать, отклонять или исправлять значения данных, отмеченные программой «флажками». Самые экстремальные значения могут оказаться правильными и очень важными при использовании гидрологических данных.

Не вызывает сомнений, что визуальная проверка графиков временных рядов опытным персоналом является быстрым и эффективным способом обнаружения аномальных значений. Поэтому большинство систем уточнения данных включают средства для построения таких графиков и выводят их на экран компьютеров, принтеров или плоттеров. Сопоставление данных с близлежащих станций — это очень простой и эффективный путь мониторинга согласованности данных, полученных на этих станциях. Однако тщательная экспертная валидация в АСП возможна далеко не всегда, поэтому в данной работе будут рассмотрены лишь методики автоматической валидации.

Для того чтобы рассмотреть весь спектр методов, разработанных для систем автоматической валидации, полезно обратить внимание на абсолютные, относительные и физико-статистические виды проверки данных[4].

Абсолютная проверка означает, что данные или кодовые значения имеют такой диапазон изменений, вероятность превышения которого равна нулю. Так, например, географические координаты станции должны находиться в пределах страны, числа месяца могут изменяться только от 1 до 31 и т.д. Данные, не прошедшие этот тест, являются неверными. Обнаружить и исправить такие ошибки обычно очень просто.

Относительные проверки включают:

- а) ожидаемый диапазон изменения переменных;
- б) максимальную ожидаемую величину между двумя последовательными измерениями;
- в) максимальную ожидаемую величину между значениями переменной на соседних станциях или датчиках.

На ранних стадиях развития и использования методик допустимые пределы ошибок рекомендуется сделать довольно широкими. Однако они не должны быть настолько широкими, чтобы это приводило к обнаружению трудно поддающегося обработке количества несогласованных значений. Эти пределы могут быть уменьшены по мере получения сведений относительно по вариации индивидуальных переменных. Поскольку эта процедура требует проведения фоновый анализ исторических данных, ожидаемые диапазоны, необходимые для выполнения относительной проверки, должны быть рассчитаны для нескольких временных периодов, включая период проведения наблюдений. Это необходимо из-за того, что при значительном увеличении временного ряда уменьшается его дисперсия. В первую очередь, сравнивают ежедневные уровни воды с ожидаемым диапазоном суточных величин за текущий период времени, например за текущий месяц. Но, поскольку имеется вероятность того, что весь ряд значений был существенно (ошибочно) завышен или занижен, последующую проверку диапазона изменений нужно проводить за более продолжительный период времени. Таким образом, в конце каждого месяца следует сравнивать текущие среднемесячные значения со средним многолетним значением за этот месяц. Таким же образом в конце гидрологического года текущее среднегодовое значение сравнивается со средним многолетним. Этот способ применим ко всем временным гидрологическим рядам [4].

Метод сравнения каждого значения с предшествующим (метод (б)) наиболее применим к переменным, имеющим существенную внутри рядную корреляцию, например, к большинству рядов наблюдений за уровнем воды. В случае очень сильной внутри рядной корреляции (что характерно, например, для уровней подземных вод) можно выполнять сравнения за несколько периодов, как описано выше для метода (а). Ежесуточные данные наблюдений подземных вод можно, прежде всего, сравнить с ожидаемыми изменениями за день, а общее месячное изменение — с ожидаемым месячным.

Метод (в) представляет собой производную от метода (б), но он использует критерии ожидаемых изменений скорее в пространстве, чем во времени. Этот вид проверки наиболее эффективен для значений уровня (и расхода) воды в водотоках из одного и того же водосбора, хотя для сравнения данных о водотоках крупных бассейнов нужны специальные средства для накопления данных наблюдений, полученных с разных станций.

Для других гидрологических переменных полезность этого метода зависит от плотности наблюдательной сети, относительно ее пространственной изменчивости. Примером является преобразование суммарного количества осадков в безразмерные единицы при помощи отношения наблюдаемых величин к некоторому среднему многолетнему значению. Это приводит к уменьшению различий, вызванных характеристиками станций или используемых датчиков.

В ряде случаев целесообразно выполнение физико-статистической проверки, которая заключается в использовании регрессионных зависимостей между связанными переменными для прогнозирования ожидаемых значений. Примером такой проверки может служить сравнение уровня воды с суммарным количеством осадков или сравнение величины испарения, полученной с помощью испарителя, с температурой. Такая проверка обычно выполняется с данными, полученными со станций, расположенных в районах с редкой сетью, когда единственным средством проверки является сравнение со значениями связанных переменных, имеющих более плотную сеть. Другая категория физико-статистической проверки используется для подтверждения согласованности данных с общими физическими и химическими законами. Этот вид проверки широко применяется для данных о качестве воды. Большинство рассмотренных относительных и физико-статистических проверок основаны на использовании временных рядов, корреляции, множественной регрессии и методик обработки поверхностных данных.

Другой метод, который может быть использован для автоматической проверки относительных отклонений наблюдаемого элемента в течение какого-то периода, заключается в использовании различных типов математических взаимосвязей (например, полиномов). Рассчитанная величина сравнивается с наблюдаемой, и, если разница между ними не превышает предварительно установленного допустимого отклонения, данные считаются правильными, а если превышает, то этим данным требуется дальнейшая проверка.

Вопрос погрешности достаточно подробно рассмотрен в нескольких стандартах ISO, имеющих отношение к гидрометрическим методам. Публикация ISO «Руководство по выражению неопределенности измерений» [6] рекомендуется в качестве основного справочника по данной теме. Подробное руководство по оцениванию погрешности измерений расхода воды, важнейшего элемента контроля входных и выходных данных в гидрологических АСП, также представлено в [9, 10].

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П1103 от 02 июня 2010 г.) по направлению «География и гидрология суши».

### **Литература**

1. International Organization for Standardization, 2000: Quality Management Systems: Requirements. ISO 9001, Geneva.
2. International Organization for Standardization, 2005: Quality Management Systems: Fundamentals and Vocabulary. ISO 9000, Geneva.
3. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, 1995: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO/IEC Guide 98, Geneva.

4. WMO Guide 168
5. World Meteorological Organization, 1983: Guide to Climatological Practices. Second edition, WMO-No. 100, Geneva ([http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/guide\\_climat\\_practices.html](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/guide_climat_practices.html)).
6. GuidetotheExpressionofUncertaintyinMeasurement, ISO, 1995
7. NationalInstituteofWaterandAtmosphericResearch, 1999
8. «Техническихправилах» ВМО №49 (TechnicalRegulations, WMO-No. 49), том III, Приложение, часть VIII.
9. World Meteorological Organization, 2006: Technical Regulations. Volume III – Hydrology, WMO-No. 49, Geneva.
10. World Meteorological Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985: Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management. WMO-No. 634, Geneva.

*В.А. Кузьмин, У. Е. Коротыгина, И.С. Макин, С.Ю. Сергеенко, Д.Ю. Румянцев*

## **ФОНОВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА В РЕЖИМЕ, БЛИЗКОМ К РЕАЛЬНОМУ ВРЕМЕНИ**

*V.A. Kuzmin, U.E. Korotygina, I.S. Makin, S.Yu. Sergeenko, D.Yu. Rummyantsev*

## **THE BACKGROUND NRT STREAMFLOW FORECASTING**

*В статье рассмотрены основные проблемы фонового прогнозирования стока в режиме, близком к реальному времени, а также пути их решения. Основное внимание уделено вопросам получения данных в режиме реального времени, их обработки и архивирования, процедурам оперативной рекалибровки гидрологических моделей и пост-обработке выпускаемых прогнозов.*

*Ключевые слова: база данных, обработка данных, моделирование, прогнозирование, калибровка модели, постобработка прогнозов.*

*In this paper, main issues of the background NRT streamflow forecasting and ways of their handling are considered. The main attention is paid to real-time data acquisition, processing and archiving, instant recalibration of hydrological models, and forecast post-processing.*

*Key words: data base, data processing, modelling, forecasting, model calibration, forecast post-processing.*

Фоновое моделирование стока в режиме, близком к реальному времени, — это полностью автоматизированная процедура, позволяющая рассчитать и отобразить общее состояние водотоков на сравнительно больших территориях, исключительно удобная и эффективная для, например, мониторинга опасных гидрологических явлений (ОГЯ) и снижения риска катастрофических наводнений [1]. Качественные фоновые прогнозы можно использовать в качестве сигнала для применения более точных, сложных и дорогостоящих (с точки зрения трудозатрат, затрат ресурсов процессора и необходимых данных) прогностических процедур, ориентированных на, например, определенный населенный пункт, опасность затопления которого выявлена при фоновом прогнозировании [2].

На многих водотоках фоновое прогнозирование — это единственный способ получить (пусть даже лишь в первом приближении) сколько-нибудь адекватную картину происходящего, например, формирующихся паводков и половодий, на основании которой принимаются те или иные управленческие решения. Поэтому фоновое прогнозирование не ограничивается только качественным описанием гидрологической обстановки на водотоках рассматриваемого региона; подобно «обычным» прогнозам, фоновые прогнозы должны и иметь точность и заблаговременность, достаточные для решения целого ряда прикладных задач. Эти задачи могут предъявлять различные требования к прогностическим данным, однако из практического опыта известно, что наибольший интерес представляют следующие виды фоновых прогнозов:

- Фоновые прогнозы фактической ситуации в удаленных точках или в пунктах наблюдений, данные с которых пока не поступили, в режиме реального времени (необходимые, например, для выявления зон повышенной опасности наводнения) [3];
- Фоновые прогнозы развития того или иного гидрологического процесса и явления в удаленных точках в недалеком прошлом (необходимые, например, для получения предварительных оценок ущерба, нанесенного наводнением) [3];
- Краткосрочные фоновые прогнозы, позволяющие оптимизировать действия по снижению ущерба от наводнения;
- Фоновые прогнозы повышенной заблаговременности. В различных странах мира прогнозы классифицируются по различным критериям; в данном случае имеется в виду, например, увеличение заблаговременности обычных краткосрочных прогнозов, обусловленной временем формирования стока на данном водосборе, за счет привлечения дополнительной информации, например, метеорологических прогнозов. Для небольшого водотока, на котором паводок формируется в течение нескольких часов, повышенная заблаговременность может быть равна 1-2 суткам. Для более крупных водотоков «обычная» заблаговременность может быть равна 4-5 суткам, а повышенная – 6-7 суткам и т.д. Важно подчеркнуть, что при этом категория прогноза с точки зрения заблаговременности не меняется. Например, краткосрочные прогнозы не становятся средне- или долгосрочными (в зависимости от классификации прогнозов, принятых в данной стране) [1, 2].

В данной работе будет рассмотрен лишь один вид прогнозов – это фоновые прогнозы стока в режиме, близком к реальному времени; в англоязычной литературе такие прогнозы обычно называются «**Near-Real-Time (NRT) forecasts**» [1, 3]. Невозможность прогнозирования стока в реальном времени обусловлена несколькими причинами:

- Время интегрирования измерений в зависимости от их дискретности (например, 1-часовой уровень воды – это средний уровень воды за 1 час, который может существенно отличаться от текущего уровня) не равно нулю;
- Время первичной (автоматической или, тем более, ручной) обработки данных наблюдателем не равно нулю;
- Дискретность данных, предоставляемых наблюдательной сетью потребителю, может быть даже больше времени интегрирования и дискретности наблюдений;
- Вторичная обработка данных потребителем (например, анализ и контроль качества) требует некоторого времени;
- Прогностическая процедура и постобработка прогнозов тоже занимает некоторое время.

Таким образом, даже в том случае, если ни на одном из этапов получения и обработки данных или выпуска прогноза не было никаких технических сбоев, имеет место задержка по отношению к реальному времени. На практике это означает, что, например, при наличии фактических данных об осадках и стоке на 9:00 местного времени, гидрограф, отражающий состояние водотока между гидрометрическими постами в 10:00, может быть смоделирован приблизительно в 11:00-12:00. Такая сравнительно небольшая задержка характерна только для развитых в гидрометеорологическом отношении стран – например, Великобритании [4], США [5, 6], Австралии

[7], Финляндии [8] и Японии [9]. В странах же с низкой пространственно временной дискретностью гидрометеорологических наблюдений такие прогнозы технически не возможны. Тем не менее, даже в таких странах (в частности, в Российской Федерации) существуют регионы, в которых очевидна потребность в точных фоновых прогнозах в режиме, близком к реальному времени. Поэтому автоматизированная система фонового прогнозирования (с различной заблаговременностью) может быть организована на локальном уровне, например, в зоне строительства объектов Олимпиады-2014 в Сочи.

При организации этой системы можно частично воспользоваться зарубежным опытом (например, опытом Метеобюро Правительства Австралии, которое организовало подобную систему в Китае в рамках гидрометеорологического обеспечения Олимпиады-2008 в Пекине), в основном, путем учета ряда недоработок и анализа способов повышения ее эффективности. Однако специфика организации Гидрометслужбы РФ не позволяет заимствовать зарубежные системы фонового прогнозирования целиком, без эффективной адаптации к условиям нашей страны [1, 2]. Для решения описанной проблемы на кафедре гидрологии суши Российского государственного гидрометеорологического университета была разработана пилотная версия системы фонового прогнозирования стока, при разработке которой были учтены и передовой зарубежный опыт, и особенности гидрометеорологического обеспечения Российской Федерации. Принципиальная схема этой системы показана на рис. 1. Рассмотрим ее более подробно.



Рис. 1 – Принципиальная схема системы фонового прогнозирования стока

Мероприятия в рамках этапов 1 и 2 выполняются либо силами локальных подразделений, обеспечивающих работу системы автоматизированных наблюдений,

либо национальными гидрометеорологическими службами или агентствами [1]. В наших экспериментах были использованы данные национальных гидрометслужб Австралии [7], США [5, 6], Финляндии [8] и Японии [9], однако организация подобных наблюдений в районе, например, олимпийских или других важных объектов не представляет особой сложности.

На третьем этапе данные, прошедшие первичную обработку поступают через сеть Интернет в динамическую базу данных аппаратно-программного комплекса «INWADA» (от англ. «INternational WAter DATA» – международные данные о воде), в которой выполняется анализ и контроль этих данных. При наличии пропусков в рядах осадков или стока, не заполненных на этапе 2, эти пропуски заполняются значениями, рассчитанными на основе локальных регрессионных уравнений, как это рекомендовано Всемирной Метеорологической Организацией [1]. Важно заметить, что в некоторых случаях данные об осадках могут быть получены при помощи гидродинамических моделей погоды (NWP); дальнейшие процедуры при этом не меняются. Прогнозы, выпущенные на основе таких данных, имеют чуть большую заблаговременность и несколько меньшую точность, однако они могут быть весьма эффективными для средних водосборов, поскольку в этом случае пространственная и временная неопределенность выпадения осадков нивелируется.

На четвертом этапе выполняется текущая рекалибровка используемой гидрологической модели. Этот этап нуждается в специальных комментариях, поскольку обычно калибровка модели выполняется крайне редко (или даже единожды!), а найденные параметры должны проходить процедуру валидации [1]. Как правило, калибровка модели основана на оптимизации (минимизации) того же критерия, который используется при валидации модели и параметров. Такой порядок рекомендован ВМО [1] и принят всеми гидрометслужбами мира. Авторы же данной работы предлагают – по крайней мере, в порядке научной дискуссии! – несколько модифицировать его, используя новейшие разработки в области автоматической калибровки оперативных гидрологических моделей, позволяющие выполнять эту процедуру быстро и эффективно [10-12]. По нашему мнению, основанному на большом объеме проведенных численных экспериментов, более эффективной является такая последовательность расчетных и прогностических процедур:

1. Получение временных рядов (обучающих выборок) длины  $L$  временных единиц (в.е.), отражающих «вход» и «выход» используемой гидрологической модели на временном интервале  $[t_1; t_L]$ , и другой необходимой информации;
2. Определение «априорного» (то есть основанного на физических свойствах моделируемого процесса или явления) набора параметров;
3. Квазилокальная калибровка прогностической модели методом SLS-E с использованием имеющихся рядов длины  $L$  в.е. (1 в.е. может составлять 10 мин, 1 час, 6 часов, 1 сутки и т.д.) [10-12];
4. Прогнозирование стока (или любого другого гидрологического процесса) на  $X$  в.е. вперед (этап 5 на рисунке 1);
5. Оценивание точности выпущенного прогноза;
6. Обновление имеющихся обучающих выборок в соответствии с временной дискретностью поступающих данных (например, на 1 в.е.):  $[t_1; t_{L+1}]$ ;

7. Рекуррентное повторение шагов 3-6 до тех пор, пока есть необходимость в выпускаемых прогнозах, например, до момента времени  $t_M$ ;
8. Эффективность методики оценивается как интегральная характеристика величин точности  $(M - L + 1)$  индивидуальных прогнозов (в соответствии с требованиями или пожеланиями потребителя прогностической информации).

Исключительно важно подчеркнуть, что *использование одного и того же критерия* точности прогнозов или эффективности прогностической методики *для калибровки модели и ее валидации* совершенно *не гарантирует наилучшего результата с практической точки зрения*. Действительно, модель, оказавшаяся оптимальной (то есть, наиболее эффективной) за период времени  $[t_1; t_2]$  может отличаться от модели, наилучшим образом описывающий прогнозируемый процесс за период времени  $[t_2; t_3]$ . Поэтому идентификация параметров модели, основанная, например, на минимизации погрешности моделирования пиков паводков или половодий  $\Delta_{peak}$ , может привести к тому, что периоды спада высоких расходов и уровней и периоды низкого стока, мало влияющие на величину  $\Delta_{peak}$ , будут смоделированы плохо. Это означает, что, например, степень увлажненности рассматриваемой территории перед началом очередного паводка будет задана неверно, поэтому этот паводок, который вполне может оказаться катастрофическим, также будет спрогнозирован неверно. В строгом смысле слова, говорить об оптимальности модели для прогнозирования данного катастрофического явления можно лишь постериорно: даже если исследуемая модель блестяще описала все предыдущие паводки, она может подвести при прогнозировании следующего. Поэтому при калибровке модели необходимо помнить, что *метод калибровки, вид целевой функции и выбранные обучающие выборки должны обеспечивать максимально точное отражение разных фаз гидрологического режима* (включая подъем уровней, пик паводка или половодья, спад уровней и низкий сток) *при различном порядке их чередования* (например, единичный паводок после засухи, серия из нескольких паводков и т.д.). Именно по этой причине наиболее перспективным видом целевой функции является мультимасштабная целевая функция MSOF (от англ. «multi-scale objective function»), предложенная В. И. Корнем с целью симитировать такой «многомасштабный» характер «ручной» калибровки и отразить разные частоты стока. В проведенных экспериментах была использована целевая функция, отражающая дисперсию погрешностей относительно разных периодов осреднения:

$$J = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_k} \right)^2 \sum_{i=1}^{m_k} (q_{o,k,i} - q_{s,k,i}(X))^2}, \quad (1)$$

где  $q_{o,k,i}$  – измеренные и смоделированные расходы воды, осредненные за интервал времени  $k$ ,  $\sigma_k$  – среднеквадратические отклонения расхода воды масштаба  $k$ ,  $n$  – общее число масштабов,  $m_k$  – число элементов каждого масштаба  $k$ .

Для калибровки американских и японских водосборов использовался критерий MSOF с часовым, суточным, недельным и месячным масштабами ( $k = 1, 2, 3, 4$ ). При калибровке австралийских и финских водосборов часовой масштаб был исключен ( $k = 1, 2, 3$ ). Заметим, что каждый из элементов суммы в приведенном

уравнении имеет весовой коэффициент, равный среднеквадратическому отклонению измеренных расходов соответствующих масштабов. Подобная схема «взвешивания» основана на предположении, что неопределенность моделируемого стока в пределах каждого из масштабов пропорциональна естественной изменчивости стока для этих масштабов. Другая причина использования критерия MSOF — это дополнительное сглаживание поверхности целевой функции, которое уменьшает вероятность «застревания» процесса поиска оптимума в незначительных «ямках». Необходимо подчеркнуть, что описанный вид целевой функции MSOF — это лишь частный случай некой идеализированной «всегомасштабной» целевой функции ASOF (от англ. «All-Scale Objective Function»), которая отражает все возможные частоты от, например 1 часа (при 1-часовой дискретности) до количества часов, составляющих интервал  $[t_1, t_2]$  [10-12].

Итак, мы выполняем калибровку модели именно таким образом, чтобы моделируемый гидрограф максимально близко «прижимался» к фактическому, при этом оставляя читателю свободу оценивать эффективность методики так, как он считает нужным.

В нашем же случае для оценивания эффективности прогнозов использовался критерий Нэша-Сатклиффа NS (Nash–Sutcliffe) [13], значения которого приведены в таблице 1. В последнем столбце таблицы приведен показатель  $k = NS_{new} / NS_{TR}$  улучшения точности прогноза по сравнению с классической процедурой калибровки и валидации (во всех случаях временные ряды, используемые для калибровки и валидации автоматически делились в пропорции 1:2, что примерно соответствует рекомендациям Корня и Кучмента [14, 15]). Заблаговременность прогнозов варьировалась от 1 часа до +24 часов, а площадь исследуемых водосборов — от 76 км<sup>2</sup> до 1200 км<sup>2</sup>.

Как следует из таблицы, предложенный подход является весьма эффективным способом фонового прогнозирования стока с малых и средних водосборов.

Таблица 1

## Значения критерия Нэша-Сатклиффа для тестовых водосборов (на независимом материале)

Страна	Число водотоков	NS	k
Австралия	12	0,89	1,24
США	44	0,84	1,34
Финляндия	4	0,77	1,18
Япония	8	0,90	1,37
Средние показатели		0,85	1,28

Представленные исследования выполнялись в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)» (проект № 2.1.1/3962 «Автоматизированная система краткосрочного прогнозирования паводков и половодий») и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (проект № П1103 «Разработка технологий прогнозирования катастрофических наводнений на реках Северо-запада Российской Федерации и методологии принятия управленческих решений»).

### Литература

1. Guide to Hydrological Practices. Fifth edition [Text] / World Meteorological Organization.—Geneva.—WMO No. 168.—1994.—739 p.
2. Руководство по гидрологическим прогнозам, т. 2: Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках [Текст] / Л.: Гидрометеиздат, 1989.— 246 с.
3. Seo, D.-J. Real-time variational assimilation of hydrologic and hydrometeorological data into operational hydrologic forecasting [Text] / D.-J. Seo, V. Koren, L. Cajina // Journal of Hydrometeorology.—2003.—No. 4.—P.627—641.
4. Официальный веб-сайт Метеорологической службы Великобритании [Электронный ресурс] // UK Met Office.—Exeter.—Режим доступа: <http://www.metoffice.gov.uk/>
5. Официальный веб-сайт Геологической службы США [Электронный ресурс] // USGS: Sunrise Valley Drive Reston, VA.— point of access: <http://waterdata.usgs.gov/nwis/rt>.
6. Официальный веб-сайт Национальной Службы Погоды США [Электронный ресурс] // U.S. NOAA National Weather Service.—Silver Spring.—Режим доступа: [http://www.nws.noaa.gov/oh/rfcddev/docs/VAR\\_wgrfc\\_doh.pdf](http://www.nws.noaa.gov/oh/rfcddev/docs/VAR_wgrfc_doh.pdf)
7. Официальный веб-сайт Метеобюро Правительства Австралии [Электронный ресурс] // Australian Government Bureau of Meteorology.—Melbourne.—Режим доступа: <http://www.bom.gov.au>
8. Официальный веб-сайт Экологического управления Финляндии [Электронный ресурс] // Helsinki.—Режим доступа: <http://www2.ymparisto.fi/scripts/oiva.asp>
9. Официальный веб-сайт Японского метеорологического агентства [Электронный ресурс] // Токио.—Режим доступа: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
10. Kuzmin, V., Seo, D.-J., Koren, V. Fast and efficient optimization of hydrologic model parameters using a priori estimates and stepwise line search // Journal of Hydrology, vol. 353, iss. 1–2, 2008, pp. 109–128.
11. Кузьмин, В.А. Основные принципы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования дождевых паводков [Текст] / В.А. Кузьмин // Метеорология и гидрология. —2009. —№ 6. —С.88–99.
12. Кузьмин, В.А. Алгоритмы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования паводков [Текст] / В.А. Кузьмин // Метеорология и гидрология.—2009. —№ 7. —С. 74–85.
13. Nash, J.E. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles [Text] / J.E. Nash, and J.V. Sutcliffe // Journal of Hydrology. —1970. —No. 10 (3), P.282–290.
14. Корень, В.И. Математические модели в прогнозах речного стока [Текст] / В.И. Корень. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 199 с.
15. Кучмент, Л.С. Математическое моделирование речного стока [Текст] / Л.С. Кучмент. —Л.: Гидрометеиздат, 1972. —191 с.

*В.А. Кузьмин, Р.Е. Ванкевич, К.В. Шеманаев*

**ОЦЕНИВАНИЕ УВЛАЖНЕННОСТИ ВОДОСБОРА ПО ДАННЫМ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, НАЗЕМНЫХ  
ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОКА**

*V.A. Kuzmin, R.E. Vankevich, K.V. Shemanaev*

**ASSESSING CATCHMENT MOISTURE CONTENT BY USING REMOTELY  
SENSED DATA, IN SITU OBSERVATIONS AND MATHEMATICAL  
STREAMFLOW MODELLING**

*Рассмотрены способы оценивания увлажненности речных водосборов, выполняемого при автоматизированном мониторинге рисков возникновения лесных, торфяных и степных пожаров, источники необходимой для этого информации, а также ключевые элементы стратегии минимизации ущерба, наносимого лесными и торфяными пожарами.*

*Ключевые слова: лесные и торфяные пожары, увлажненность водосбора, гидрологическое моделирование, параметры состояния, влажность почвы.*

*Several ways of assessing river catchments moisture content performed in frameworks of the automatic wildfire risk monitoring, data sources, and key elements of the strategy to minimize losses caused by wildfires are considered in this paper.*

*Key words: wildfires, catchment moisture content, hydrological modelling, model states, soil moisture.*

## **1. Общие сведения**

В настоящее время в РГГМУ выполняется ряд проблемно-ориентированных поисковых исследований в рамках разработки комплекса технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы при лесных, торфяных и степных пожарах (рис. 1). Одной из составных частей этого комплекса является автоматическое оценивание риска возникновения лесных и торфяных пожаров как функции состояния подстилающей поверхности и способствующих возгоранию метеорологических условий.

Риск и опасность лесных, торфяных и степных пожаров (как возникших в результате сухих гроз, так и вызванных антропогенными причинами – умышленным поджогом, непогашенным костром, «случайной» искрой на линии электропередач) определяются увлажненностью рассматриваемой территории, температурой и влажностью воздуха, а также показателями пожарной опасности растительного покрова и подстилающей поверхности – горючестью, воспламеняемостью, дымообразующей способностью, интенсивностью распространения пламени и токсичностью [1-5]. Данная статья посвящена лишь первому из перечисленных факторов, а именно – способам оценивания увлажненности водосбора по данным дистанционного зондирования, наземных гидрометрических наблюдений и математического моделирования

стока. Эту же задачу необходимо решать в оперативном режиме при осуществлении специализированного гидрометеорологического обеспечения гидроэнергетики, железнодорожного транспорта и других отраслей экономики нашей страны.



Рис. 1 — Структура и состав разрабатываемого в РГГМУ комплекса технологий по мониторингу, моделированию, прогнозированию и визуализации состояния подстилающей поверхности и атмосферы при лесных и торфяных пожарах

## 2. Стратегии минимизации ущерба, наносимого лесными, торфяными и степными пожарами

На сегодняшний день в различных странах функционируют несколько систем мониторинга пожарной опасности. Наиболее хорошо известными и проверенными на практике системами мониторинга природных пожаров являются Европейская система информации о пожарах (The European Forest Fire Information System) [6], Канадская система оценивания пожарной опасности (Canadian Forest Fire Danger Rating System CFFDRS) [7], Национальные системы оценивания пожарной опасности США (NFDRS и более современная WFAS) [4, 5, 8, 9] и система оценивания пожарной опасности Мак-Артура (McArthur Forest Fire Danger Index) в Австралии [10]. Динамические (регулярно обновляемые) базы данных этих систем содержат всю необходимую информацию, необходимую для анализа рисков возникновения пожаров: длинные временные ряды наблюдений за возникновением пожаров, наблюдения на метеорологических станциях, а также большой объем дополнительной информации, такой как мелкомасштабные карты покрытия земной поверхности, топографические данные и цифровые модели рельефа.

Важно заметить, что эффективное функционирование таких систем в оперативном режиме соответствует первой из двух стратегий принятия противопожарных мер, проиллюстрированных на рис. 2. При наличии экономической и социальной целесообразности (например, в густонаселенных промышленных районах) основные инвестиции носят превентивный характер: средства вкладываются в постоянный инструментальный мониторинг как факторов, определяющих риск пожара, так и самих очагов возгорания. В связи с тем, что очаги возгорания в этом случае можно обнаружить на ранней стадии распространения пожара, его эффективная ликвидация может быть проведена адресно, быстро и сравнительно недорого. Однако существует некоторый риск, что инвестиции в инструментальный мониторинг не окупятся, поскольку пожар может так и не возникнуть, прежде чем установленный инструментальный исчерпает свой ресурс.

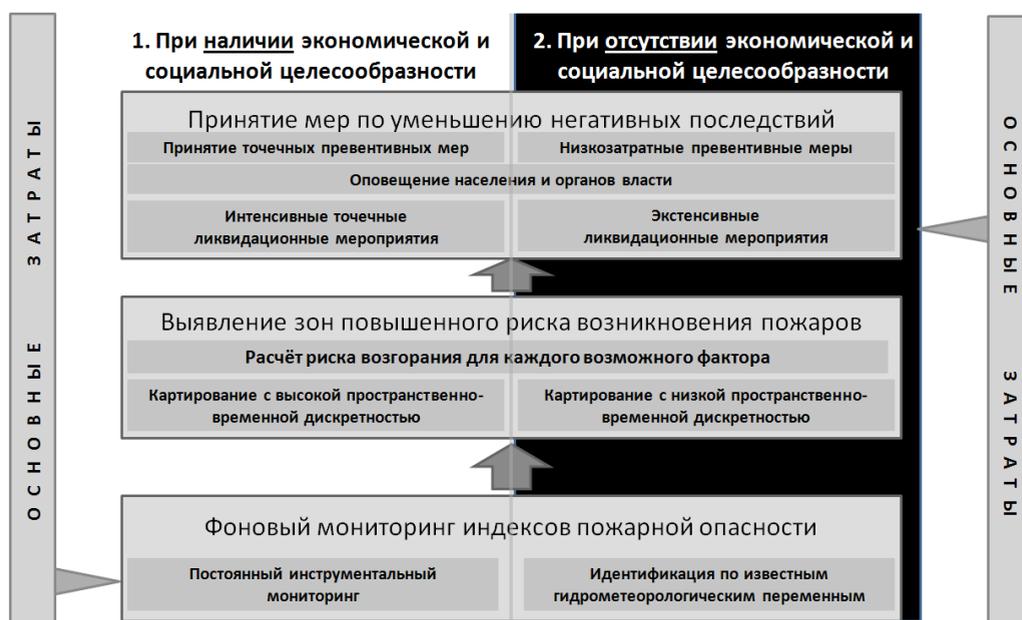


Рис. 2 — Две стратегии противопожарных мер

При отсутствии экономической и социальной целесообразности (например, в малонаселенных районах или районах с низкой стоимостью земельных угодий) основные инвестиции делаются *a posteriori*, когда лесной или торфяной пожар уже является фактом. Такая политика также характерна для стран с недостаточно эффективной системой государственного управления, которая не подразумевает оптимизацию расходования государственных средств за многолетний период времени и допускает формирование паразитических коррупционных подсистем, поскольку высокая неопределенность пространственно-временного распределения пожара автоматически означает потерю финансового контроля над расходую-

мыми ресурсами. По мере экономического роста и усиления системы управления приходит понимание того факта, что превентивные противопожарные меры — это более эффективный путь уменьшения негативных последствий лесных и торфяных пожаров, и прежде всего — последствий социально-гуманитарных, поскольку он обеспечивает более высокий уровень противопожарной безопасности населённых пунктов.

Что касается нашей страны, то она занимает некое промежуточное положение: в густонаселенных промышленных районах, преимущественно расположенных в европейской части, несомненно, целесообразно применение первой — «превентивной» — стратегии, а в отдаленных малонаселенных районах Сибири и Дальнего Востока — второй, «апостериорной». Высокий уровень неоднородности экономической ценности различных регионов России, к сожалению, не позволяет применять единую стратегию принятия противопожарных мер на всей территории страны. Тем не менее, можно сформулировать основные принципы стратегии снижения ущерба от лесных, торфяных и степных пожаров, которая может быть одобрена на федеральном уровне и затем применена различными регионами вне зависимости от уровня их экономического благополучия:

- 1) в целях обеспечения высокоточного мониторинга лесных и торфяных пожаров потребуются развитие наземной сети недорогих инструментальных средств наблюдения за ключевыми характеристиками подстилающей поверхности в пожароопасных районах, а также соответствующих технологий обработки получаемой информации;
- 2) в связи с высокой долей лесных и торфяных пожаров, вызванных антропогенными причинами (включая умышленный поджог), потребуются создание законодательно базы государственной системы противопожарного страхования. Это позволит уменьшить число умышленных поджогов, совершаемых с целью получения компенсации от государства или скрыть незаконную вырубку леса, снизить нагрузку на федеральный и местные бюджеты и привлечь дополнительные средства на развитие сети противопожарного мониторинга. В свою очередь, для создания такой сети потребуются создание комплекса новых технологий по производству измерений и обработке полученных данных.
- 3) при комплексном подходе к дальнейшему развитию системы национальной безопасности РФ, включающей подсистемы (например, государственные, ведомственные и отраслевые службы) мониторинга и прогнозирования опасных природных явлений потребуются интегрирование этих подсистем и оптимизация их функционирования. Для этого необходимо разработать фундаментальную научную и законодательную базу, методики комплексного функционирования подсистем, а также техническое и управленческое программное обеспечение.

Рассмотренные ниже способы оценивания увлажненности речных водосборов, выполняемого при автоматизированном мониторинге рисков возникновения лесных, торфяных и степных пожаров, целиком и полностью соответствуют приведенной концепции.

### 3. Оценивание увлажненности территории по спутниковым данным

Спутниковые данные дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли широко используются для решения целого ряда задач, связанных с мониторингом природных пожаров [11, 12]. Так, например, для оперативного детектирования очагов возгорания и расчета эмиссии газообразных продуктов горения в атмосферу наиболее подходящими являются системы низкоорбитальных спутников программы EOS (Earth Observation System) имеющих в составе бортового оборудования спектрорадиометр MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) [13, 14], обеспечивающих детектирование следующих признаков, подтверждающих наличие действующего пожара:

- 1) наличие на месте обнаружения пожара гари, автоматически детектируемой по данным SPOT VGT;
- 2) наличие на месте обнаружения пожара гари, визуально детектированной по данным MODIS;
- 3) наличие визуально детектируемых дымов;
- 4) детектирование пожаров в одном и том же районе на нескольких последовательных сеансах спутников TERRA, AQUA и NOAA [11, 13, 15].

Заметим, что эти спутниковые наблюдения позволяют получать и другую важную с точки зрения мониторинга пожаров и оценивания риска пожарной опасности информацию (таблица 1), например, данные о влажности и температуре верхнего слоя почвы и растительности. Такие данные охватывают сравнительно крупные территории, но при этом не отличаются высокой точностью, поэтому для дальнейшего использования они обязательно пройти процедуру ассимиляции (усвоения) с использованием данных наземных наблюдений, рассмотренных в следующем разделе.

Таблица 1

**Виды (диапазоны) дистанционного зондирования, применяемые для определения влажности и других характеристик верхнего слоя почвы**

Диапазон ДЗ	Переменная	Достоинства	Недостатки	Источники шумов	Датчики
Видимый	Альbedo почвы	Простота, хорошее покрытие	Множество источников шумов	Двумерная функция рас-пределения отражательной способности объектов, облачность, цвет почвы, растительность	AVHRR MODIS Landsat SPOT
Коротковолновый инфракрасный	Влажность почвы и растительности	Очень чувствителен по отношению к влажности почвы	Существенное влияние сигнала, отражающего влажность почвы	Облачность, растительный покров	MODIS ASTER

Диапазон ДЗ	Переменная	Достоинства	Недостатки	Источники шумов	Датчики
Тепловой инфракрасный	Температура поверхности	Высокое разрешение, широкая полоса захвата, хорошее покрытие, высокая частота наблюдений, физическая реалистичность	Ширина покрытия и частота наблюдений ограничены облачностью	Метеоусловия	IR-MSS AVHRR MODIS
Активный микроволновый	Коэффициент обратного рассеяния, диэлектрические характеристики	Низкий уровень атмосферных шумов, высокое разрешение	Ограниченная полоса захвата	Шероховатость и рельеф поверхности Земли, растительный покров	ERS-Scatterometer
Пассивный микроволновый	Яркость, температура почвы, диэлектрические характеристики	Низкий уровень атмосферных шумов, высокая проникаемость через слой растительности	Низкое разрешение, подверженность радиопомехам	Шероховатость поверхности Земли, растительность, температура, средства связи	SMMR AMSR-E SMOS Hydros

Обозначения датчиков:

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

MODIS – MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

Landsat – программаспутниковыхнаблюдений, проводимаяNASAиUSGS

SPOT – французская программа спутникового зондирования Земли

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

IR-MSS – Infrared Multispectral Scanner

ERS-Scatterometer – европейский радар, работающий в C-диапазоне с пространственным разрешением около 50 км

SMMR – scanning multichannel microwave radiometer

AMSR-E – Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth observing system

SMOS – SoilMoistureandOceanSalinity (европейская программа спутникового зондирования Земли)

Hydros – HYDRosphere State mission (программа NASA по спутниковому зондированию Земли)

#### **4. Оценивание увлажненности территории по данным наземных наблюдений**

##### **4.1. Инструментальный мониторинг**

Как было отмечено выше, мониторинг почвенной влаги может осуществляться как при помощи непосредственных инструментальных наблюдений с использова-

нием широкого спектра представленных на рынке сенсоров и логгеров (например, выпускаемых британской фирмой «Delta-T», которые показаны на рис. 3), так и на основе не прямой идентификации, выполняемой путём расчёта по данным о других гидрометеорологических переменных.

Инструментальный мониторинг почвенной влаги целесообразно производить с целью получения фактических данных о состоянии почвы орошаемых сельскохозяйственных угодий, поскольку во многих странах ответственность за сохранность установленных сенсоров и логгеров несут землевладельцы и арендаторы, заинтересованные в оптимальном расходовании воды. Поэтому в США, Австралии, Новой Зеландии, Канаде и некоторых других странах плотность контактных наблюдений за влажностью почвы весьма высока. В Российской Федерации и других странах СНГ, к сожалению, подобная организация наблюдений в настоящее время не представляется возможной, поэтому в них имеет смысл размещать измерительное оборудование лишь на охраняемых территориях. Пространственная дискретность получаемых данных при этом будет сравнительно низкой и недостаточной для прогнозирования стока, однако такие данные можно будет использовать для усвоения данных авиационного и спутникового зондирования, охватывающего более крупные территории.

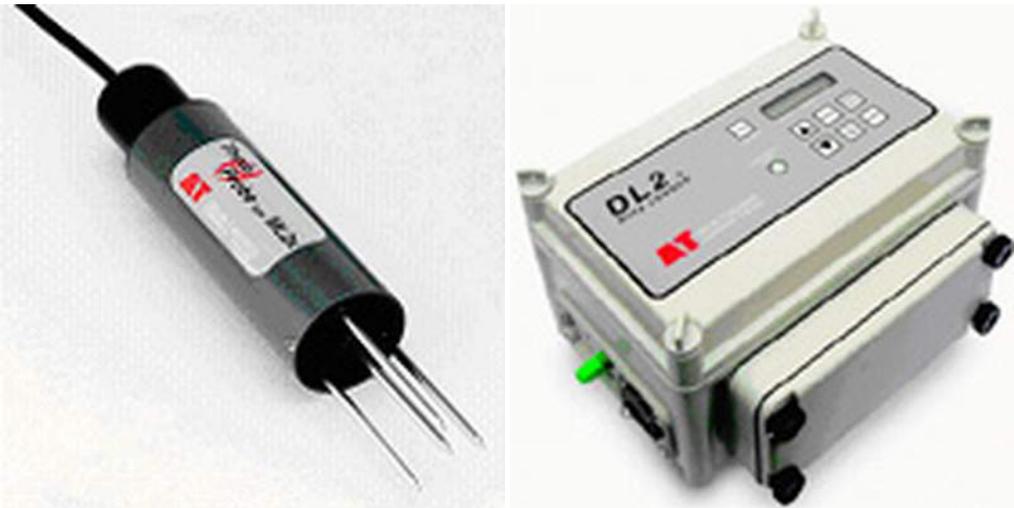


Рис. 3 — Сенсор почвенной влаги и логгер фирмы «Delta-T»

Такой способ использования скудных данных инструментального мониторинга влажности почвы является исключительно важным технологическим элементом фонового прогнозирования стока, поскольку неусвоенные данные спутниковых измерений могут значительно отличаться от данных наземных наблюдений и поэтому для адекватного оценивания начальной увлажненности водосбора перед выпадением осадков, формирующих паводок, в своем оригинальном виде они не подходят.

### **4.2. Оценивание увлажненности водосбора по данным гидрометрических наблюдений**

Одним из способов непрямой идентификации является гидрологический подход к мониторингу и прогнозированию рисков лесных пожаров.

В существующей методике гидрологического прогнозирования лесных пожаров предполагается, что величина речного стока является индикатором насыщенности влагой водосбора и, следовательно, степени влажности топлива для пожара. Лесной пожар произойдет с наибольшей вероятностью тогда, когда расход воды в реке будет ниже некоторого определенного критического значения, но это действительно не во всех случаях. Накануне больших пожаров наблюдается, как правило, низкий уровень воды, но бывают варианты, когда расходы воды в реке не так уж малы. Перед катастрофическим пожаром расход воды становится гораздо меньше, чем обычно. Но это не значит, что он может очень сильно отличаться от расхода в другие годы. А на некоторых реках во время засушливых периодов сток вообще отсутствует. Из этих примеров следует, что для оценки влажности топлива необходимо рассматривать не только величину минимального стока, но и характерные особенности кривых спада гидрографов стока. На водосборах со сложной гидрогеологической структурой кривые спада обычно слегка вогнуты и могут быть представлены несколькими прямыми линиями. При длительной засухе кривые спада становятся более крутыми, чем обычно. При этом вогнутая форма кривой может смениться на выпуклую. Обычно кривые спада прерываются небольшими дождями или моросью. В этом случае измеряют величину интенсивности спада в интервалах между дождями. Сток внезапно может прекратиться уменьшаться и будет держаться на некотором небольшом значении, несмотря на сухую погоду. Это говорит о том, что основной сток иссяк и продолжается только глубокий родниковый сток и разгрузка артезианских вод. Это означает начало критически огнеопасного периода. Сезон дождей, прерывающий засуху, обычно облегчает положение. К сожалению, из-за неравномерного характера осадков в течение сухого периода трудно оценить эффект такого дождя на основе метеорологических данных. Однако существуют простые способы определения окончания критической опасности пожара. Если после дождя расход воды восстанавливается и убывает с обычной скоростью, то непосредственная угроза большого пожара миновала. Крутой спад и возврат к величине стока до дождя означает, что дождь не дал результатов. Можно выделить две группы предикторов, определяющих пожарную опасность лесов:

**А. Ранние предикторы:**

- 1) низкий сток воды;
- 2) быстрый спад гидрографа стока;
- 3) изменение кривой спада от вогнутой формы к выпуклой.

**В. Поздние предикторы:**

- 1) стабилизация спада до величины глубокого стока;
- 2) резкий спад после промежуточных небольших дождей;
- 3) выпуклая форма кривой спада после промежуточных дождей;
- 4) резкая стабилизация спада к глубокому стоку спустя несколько дней после небольшого дождя.

В чем заключаются основные преимущества гидрологического метода прогноза по сравнению с метеорологическим?

Во-первых, гидрометрические данные, описывающие кривую спада обычно более точны и более представительны для всего водосбора, чем метеорологические измерения, определяемые по ограниченному числу станций со сравнительно низкой пространственной дискретностью.

Во-вторых, исключается необходимость определения одной из наиболее неопределенных и изменчивых метеорологических переменных – испарения, поскольку кривая спада является интегрирующей характеристикой водного баланса, отражающей, в частности, и содержание влаги в верхнем слое почвы.

В-третьих, если в какой-то день происходит ошибка в оценке интенсивности спада гидрографа стока, то она никак не влияет на определение величины спада в последующие дни. Кривая спада отражает емкость водоносных горизонтов и их способность подпитывать верхние слои почвы за счет капиллярного поднятия. Поскольку деревья могут получать воду из нижних почвенных горизонтов, то они могут пережить даже экстремальную засуху. Но когда эти внешние резервы истощаются, лес засыхает. Повышение влажности воздуха, уменьшение скорости ветра, даже морось в течение нескольких дней могут только отсрочить возникновение пожара, но не исключить его.

### **5. Оценивание увлажненности территории по данным математического моделирования стока**

Помимо описанных подходов, ВМО рекомендует оценивать увлажненность рассматриваемой территории на основе анализа «выхода» или переменных состояния концептуальных гидрологических моделей (рисунок 4), прошедших процедуру валидации параметров, определенных тем или иным способом [16], например, на основе сопоставления моделируемого и фактического стока или моделируемых и фактических значений влажности верхнего слоя почвы.

В число моделей, наилучшим образом подходящих для моделирования кривой спада уровней или расходов воды, входят модель «Сакраменто» (the Sacramento Soil Moisture Accounting Model) [17], модель «VIC» (the Variable Infiltration Capacity Macroscale Hydrologic model) [18], модель талого и дождевого стока, разработанной В.И. Корнем и В.А. Бельчиковым в начале 1980-х годов (известной также как модель Гидрометцентра) [19], австралийская воднобалансовая модель «AWBM» (the Australian Water Balance Model) [20], модель «SIMHYD» (от англ. «SIMplified HYDrograph» – упрощенный гидрограф) [21], а также модель «SMAR» (Soil Moisture Accounting Run-off model) [22].

Эти модели вполне успешно используются для моделирования стока, причём в качестве переменных состояния (states) используется количественная характеристика содержания почвенной влаги. Однако глубокий анализ этих моделей показал, что эти модели технически сложно, если вообще возможно, использовать для расчёта почвенной влаги по известному стоку (рис. 4). Поэтому возникла необходимость разработки так называемой «заместительной» концептуальной модели, ориентированной на моделирование не только стока, но и эволюции влажности верхнего слоя почвы, - модели «MLCM» (аббревиатура от англ. «Multi-Layer Conceptual Model»).

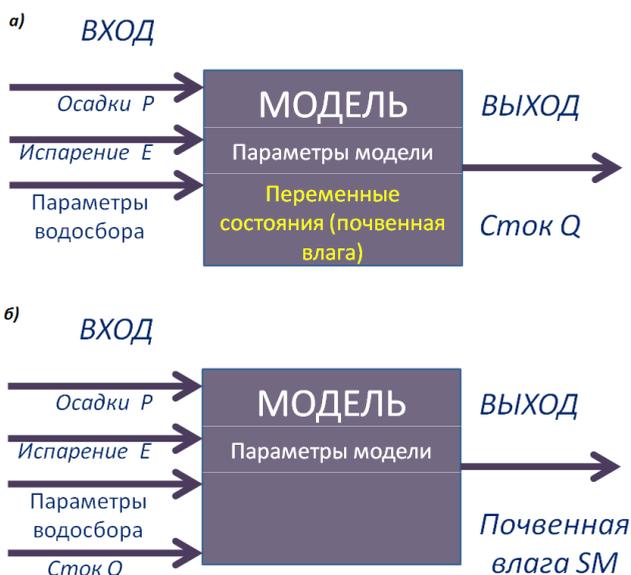


Рис. 4 — Возможность использования гидрологической модели (а) для расчёта стока по известному гидрометеорологическому «входу» и (б) для расчёта содержания почвенной влаги по обычному гидрометеорологическому «входу» и данным о стоке

Рассмотрим заместительную модель «MLCM» (версия 11.2011) более подробно.

Модель «MLCM» несколько проще модели «Сакраменто», но при этом она является более гибкой, поскольку позволяет выполнить распространение воды в двух зонах (и 5 емкостях), а в  $N$  слоях, причём значение  $N$  принципиально может быть каким угодно, оно подбирается методами оптимизации вместе с другими параметрами или задается пользователем. Как показал первый опыт моделирования стока, главным лимитирующим фактором для числа слоев  $N$  является время, которое предполагается затратить на калибровку модели, поскольку для каждого слоя должно быть задано два параметра (мощность слоя  $Z_i$  и скорость инфильтрации  $\alpha_i$ ). Учитывая скорость поверхностного стекания  $\alpha_0$ , и параметр задержки отклика  $T_R$ , отражающий поверхностное задержание воды в микро- и мезодепрессиях, общее число параметров модели  $N_p$  равно  $N_p = 2N + 2$ .

В целом же, сравнивая модели «Сакраменто» и MLCM, можно отметить их значительное сходство. В частности, обе модели:

- 1) являются воднобалансовыми и концептуальными;
- 2) учитывают основные виды потерь воды (испарение, транспирация, потери из русла);
- 3) имеют одинаковый внешний блок трансформации паводочной волны.

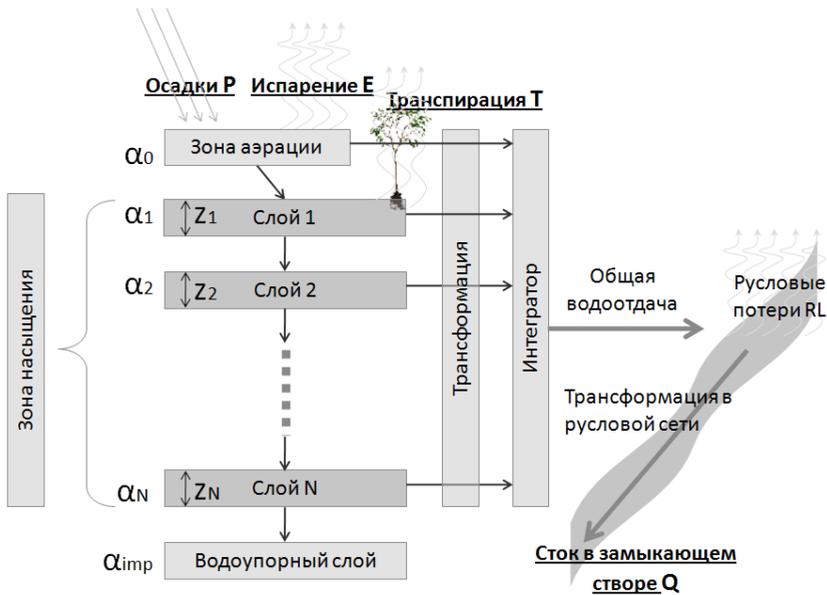


Рис. 5 — Концептуальная схема модели «MLCM» (поверхностное задержание стока на схеме не показано)

В то же время, эти модели имеют ряд существенных отличий. Во-первых, модель MLCM имеет более высокий уровень концептуализации. В модели MLCM нет разделения воды на связанную и несвязанную, а поверхностный, внутрипочвенный и базисный сток по отдельности не идентифицируются. В то же время, модель MLCM является более гибкой, поскольку число компонент стока, трансформирующихся (с различной скоростью фильтрации), является величиной переменной. Это свойство модели MLCM позволяет моделировать сток на водосборах со сложным гидрогеологическим строением. В общем случае число слоев может определяться ресурсами процессора, ограничивающими общее число параметров модели при калибровке.

Во-вторых, модель MLCM можно использовать при меньшем объеме входной информации. В частности, не требуются данные о почвогрунтах и их гидравлических свойствах, поскольку коэффициенты фильтрации каждого слоя являются независимыми параметрами и, следовательно, могут быть идентифицированы по отдельности.

В-третьих, временная дискретность модели MLCM является переменной (в отличие от базовых конфигураций модели «Сакраменто», предусматривающих дискретность 1 ч, 6 ч и 24 ч). Это очень важно при фоновом моделировании стока на больших территориях, когда может потребоваться различная дискретность (например, 10-минутная или получасовая для малых водотоков и 12-часовая или суточная для больших).

Наконец, заметим, что в модели «MLCM» количество связанной воды специальным параметром, как это делается в модели «Сакраменто», не отражается с целью сокращения числа идентифицируемых параметров. Это исключительно важно при использовании модели «MLCM» как модели с распределенными или полураспределенными

параметрами. Тем не менее, влагоудерживающая способность почвы моделью все-таки косвенно учитывается. Во-первых, для этого выполняется так называемый «прогрев» модели (warm-up), позволяющий насытить влагой все слои и достаточно адекватно отразить начальные условия. Во-вторых, погрешность, обусловленная влагоудерживающей способностью почвы, в некоторой степени учитывается параметрами  $\alpha_i$ .

Таблица 2

Входные данные заместительной модели MLCM

Тип данных	Обозначение
Осадки	$P$
Испарение*	$E$
Площадь водосбора	$S$
Длина основного русла	$L$
Средняя длина правого и левого склона	$LS_R, LS_L$
Фактический сток**	$Q$

Примечание. 1) Данные об испарении могут также отражать транспирацию и потери из русла; 2) Данные о фактическом стоке используются для калибровки модели.

Первые численные эксперименты по моделированию стока при помощи модели «MLCM» показали ее принципиальную пригодность для решения поставленной задачи, однако программное обеспечение, реализующее эту модель, нуждается в существенной доработке, необходимой для проведения массовых расчетов в полностью автоматическом режиме. Это позволит сделать окончательный вывод об эффективности применения этой модели, а также разработать программу проведения численных экспериментов, направленных на сопоставление результатов оценивания почвенной влаги при помощи подходов, описанных в данной статье. Результаты этих экспериментов будут представлены в последующих публикациях.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.5 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № 16.515.11.5049 от 02 июня 2011 г.)

### Литература

1. ГОСТ Р 22.1.09-99. Группа Т58. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров.
2. Барановский Н.В., Гришин А.М., Лоскутникова Т.П. Информационно-прогностическая система определения вероятности возникновения лесных пожаров [Текст] / Н.В.Барановский, А.М.Гришин, Т.П.Лоскутникова // Вычислительные технологии. 2003. № 2. С. 16 – 26.
3. Вонский С.М. Определение природной пожарной опасности в лесу. [Текст] / С.М. Вонский. Методические рекомендации. – Л.: ЛенНИИЛХ, 1981. 52 с.
4. Damoah, Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 1-8.Vol.2, 2006.
5. Westphal and Toon, The ecology of fire. New York, NY: Cambridge University Press. 346 pp., 1991.
6. San-Miguel-Ayanz, Barbosa, P., Liberta, G., Schmuck, G., Schulte, E., Bucella, P. The European Forest Fire Information System. A European Strategy towards ForestFire Management. [Text] / San-Miguel-Ayanz, Barbosa, P., Liberta, G., Schmuck, G., Schulte, E., Bucella, P.3rd International Wildland Fire Conference and Exhibition, ITTO, Erickson Air-Crane, FMWG, 3-6 October 2003, Sydney (AUS).

7. *Taylor, S.W., Alexander, M.E.* Science, technology, and human factors in fire danger rating: the Canadian experience. [Text] / Taylor, S.W., Alexander, M.E. *Int. J. Wildland Fire* 15, 2006, 121–135.
8. *Burgan, Robert E.* 1988. 1988 revisions to the 1978 National Fire-Danger Rating System. Res. Pap. SE-273. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 39 pp.
9. *Burgan, R.E., R.A. Hartford, and J.C. Eidenshink.* 1996. Using NDVI to assess departure from average greenness and its relation to fire business. [Text] / Burgan, R.E., R.A. Hartford, and J.C. Eidenshink. Gen. Tech. Rep. INT-333. Ogden, Utah, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 8 p.
10. *Andrew J. Dowdy, Graham A. Mills, Klara Finkele and William de Groot.* Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index CAWCR [Текст] / CSIRO Technical Report No. 10, Canberra, June 2009.
11. Применение спутниковых данных для оценки засухи [Электронный ресурс] / : <http://ckm.iszf.irk.ru/html/missions/finerisk/index.php>
12. *Климова Е.Г., Дубровская О.А.* Вычислительные технологии оценки состояния окружающей среды по данным наблюдений Земли из космоса. - *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, Новосибирск, т. 4, №1 - 2008. – стр. 315-324.
13. Официальный веб-сайт Национального аэрокосмического агентства США [Электронный ресурс] / <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/>
14. *L. Giglio, et al.* Algorithm Technical Background Document. MODIS fire products. Version 2.3 [Text] / L. Giglio 1 October 2006.
15. *Barrett, D., Kuzmin, V., Walker, J., McVicar, T., and Draper, C.*, Improved stream flow forecasting by coupling satellite observations, in situ data and catchment models using data assimilation methods. [Text] / D.Barrett, V.Kuzmin, J.Walker, T.McVicar and C.Draper, eWater CRC Technical Report, 2008, 77 p.
16. *Kuzmin, V., Seo, D.-J., Koren, V.*, Fast and efficient optimization of hydrologic model parameters using a priori estimates and stepwise line search, [Text] / V. Kuzmin, D.-J. Seo, V. Koren, *Journal of Hydrology*, Volume 353, Issues 1 – 2, 20 May 2008, pp. 109 – 128.
17. *Burnash, R.J.C., Ferral, R.L. and McGuire, R.A.* 1973. A generalised streamflow simulation system – conceptual modeling for digital computers. Technical Report, Joint Federal and State River Forecast Center. [Text] / R.J.C. Burnash, R.L.Ferral and R.A McGuire US NWS and California DWR, Sacramento, CA. 204 p.
18. *Liang, X.* One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model [Text] / X. Liang, D.P. Lettenmaier, E. F.Wood // *Journal of Geophysical Research.* –1996.–Vol. 101(D16). –P.21,403 – 21,422.
19. *Корень, В.И.* Математические модели в прогнозах речного стока [Текст]/ В.И. Корень. — Л.: Гидрометеониздат, 1991. — 199 с.
20. *Boughton, W.* 2004. The Australian water balance model. [Text] / W.Boughton *Environmental Modelling and Software* 19: 943–956.
21. *Chiew, F.H.S.* Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD [Text] / F.H.S. Chiew, M.C. Peel and A.W. Western // Edited by V.P. Singh and D.K. Frevert / *Mathematical models of small watershed hydrology and applications.* – Littleton, Colorado: Water Resources Publication, 2002.—P.335–367.
22. *Fazal, M.* Estimating groundwater recharge using the SMAR conceptual model calibrated by genetic algorithm [Text] / M. Fazal, M. Imaizumi, S. Ishida, T. Kawachi and T. Tsuchihara // *Journal of Hydrology.*—2005.—No. 303.—P.56 – 78.

*Н.Б. Барышников, М.В. Соболев, Е.А. Поташко, Е.М. Скоморохова, Е.С. Субботина*

### **РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА БЕРЕГАХ И В РУСЛАХ РЕК В ЦЕЛЯХ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ**

*N.B. Barishnikov, M.V. Sobolev, E.A. Potashko, E.M. Skomorohova, E.S. Subbotina*

### **DEVELOPMENT PRINCIPLES OF OPTIMAL PLACING OF THE HYDRAULIC WORKS ON BANKS AND RIVERBEDS FOR MINIMIZATION POTENTIAL HYDROLOGICAL RISKS**

*Рассмотрены принципы размещения на берегах и в руслах равнинных рек активных и пассивных гидротехнических сооружений. Вскрыты причины гидрологических рисков при проектировании и строительстве активных и пассивных гидротехнических сооружений. В качестве таковых рассмотрены риски при строительстве и эксплуатации водохранилищ, мостовых переходов, водозаборов, водовыпусков и переходов трубопроводов через реки. Приведены рекомендации по минимизации возможных ущербов при этих рисках.*

*Ключевые слова: гидрологические риски, регулирующие водохранилища, ГЭС, мосты, мостовые переходы, переходы трубопроводов, русловые процессы, реки, минимизация, натурная информация.*

*Principles of optimal placing active and passive hydraulic works on banks and riverbeds of the peneplain rivers have been examined. Reasons of hydrological risks in time of the designing and building active and passive hydraulic works have been identified. Among these reasons have been examined: risks in time of the building and exploitation of reservoirs, bridges, water intakes, water outlets and pipelines crossings across the rivers. Recommendations on minimization potential damages from this risks have been given.*

*Key words: hydrological risks, regulating reservoirs, hydropower plants, bridges, bridge and pipeline crossings, river bed evolutions, rivers, minimization, location information.*

В соответствии с современной концепцией все гидротехнические сооружения и водохозяйственные мероприятия, проводимые в бассейне или в русле и пойме реки, подразделяются на активные и пассивные (рис.1). К активным относятся сооружения и мероприятия, которые не только испытывают на себе воздействие русловых процессов, но и оказывают на них существенное влияние. К пассивным относятся те сооружения, которые только испытывают на себе воздействие русловых процессов, но существенного влияния на них не оказывают.

Исходя из этого, рекомендации по размещению этих двух групп сооружений должны существенно отличаться друг от друга. Для первой группы сооружений необходимо оценивать не только то какое воздействие на них окажут русловые процессы, но и какое влияние окажут эти сооружения на окружающую среду в целом и русловые

процессы в частности. При их проектировании необходимо учитывать фоновый прогноз развития русловых процессов на период в 100 лет и более.

Для пассивных сооружений необходимо оценить какое воздействие русловые процессы окажут на них, а так же оценить последствия влияния сооружения на экологическую обстановку в районе сооружения.



Рис. 1 – Типизация речных инженерных сооружений по их воздействию на русловые и пойменные процессы (по Б.Ф. Снисценко)

Для этих сооружений необходимо составить локальный прогноз развития русловых деформаций на период действия сооружения, которое рассчитано на 30-50 лет. Локальный прогноз разрабатывается на основе фонового прогноза. При этом, в зави-

симости от типа сооружения, может быть использован либо гидроморфологический, либо гидравлический метод [1,2].

Прежде чем перейти к анализу принципов размещения гидротехнических сооружений отметим, что основные ущербы целиком и полностью определяются человеческим фактором. Именно незнание основных закономерностей развития русловых процессов приводят к принятию неправильных решений и, как следствие, к большим экономическим ущербам.

Рассмотрим основные принципы размещения гидротехнических сооружений на берегах и в руслах рек.

Наиболее важным является выбор местоположения плотины ГЭС и регулирующего водохранилища. При этом рассматривается и оценивается несколько вариантов и из них выбирается оптимальный с точки зрения экономики и экологической безопасности.

При выборе местоположения плотины ГЭС прежде всего рассматривается величина напора, одна из главных составляющих, определяющих мощность ГЭС ( $N=\beta QH$ ). Здесь  $Q$  – расчётное среднесуточное значение расхода воды,  $H$  – величина напора и  $\beta$  – коэффициент равный произведению коэффициентов полезного действия на величину ускорения силы тяжести ( $g$ ).

Величина напора в общем и целом определяет площади затопления и подтопления земель. В качестве примера можно привести Чебоксарскую ГЭС, построенную не только для выработки энергии, но и для обеспечения повышенных значений минимальных транзитных глубин. Причём в данном случае основным фактором является не получение энергии, хотя этот фактор также имеет большое значение, а обеспечение минимальной транзитной глубины, примерно равной 4,0 метрам на участке от г. Городец, где расположена плотина Горьковской ГЭС, до г. Н. Новгород. Именно этот участок лимитирует судоходство с осадкой 3,5-4,0 метра, так как, несмотря на мощные дноуглубительные работы, минимальная транзитная глубина, отсчитываемая от проектного уровня, не превышает 2,3-2,5 м. На этом участке длиной 54 км, ежегодно удаляется до 11 миллионов кубометров аллювия, но при увеличении разработки лимитирующих перекатов происходит посадка уровня примерно на такую же величину, на которую уменьшились отметки дна лимитирующих перекатов. Сразу же встаёт вопрос, в чём причина такого положения и какой выход из него?

Действительно, одной из основных задач строительства каскада ГЭС на р. Волге была необходимость обеспечения минимальной транзитной глубины на всём расстоянии от Москвы до Астрахани примерно равной 4 метрам. В системе каскада ГЭС, завершающую стадию регулирования стока и обеспечению 4-х метровых минимальных транзитных глубин отводилось водохранилище Чебоксарской ГЭС. По проектным данным оно должно быть заполнено водой до отметки 68,0 метра. Однако в настоящее время оно заполнено водой до отметки 63,0 метров, т.е. на 5,0 метров ниже проектной отметки, что и послужило причиной уменьшения минимальных транзитных глубин на участке Н. Новгород – Городец. Основными причинами не наполнения водохранилища до НПУ явились большие площади затопления и особенно подтопления плодородных сельскохозяйственных земель, а также подтопление г. Н. Новгород.

Поэтому необходимо было уже на стадии проектирования изучить другие возможные варианты решения этой проблемы. Этого сделано не было, что и привело к большим гидрологическим рискам и нанесению ущерба как энергетике, так и судоходству. В результате, судоходство и энергетика испытывают большие трудности, особенно в маловодные годы.

Рассмотрим возможные пути минимизации гидрологических рисков. Таких путей два. Первый — это подъём уровня в водохранилище на 5 метров до отметки в 68,0 метров. Но этот путь, как уже указывалось, нельзя признать эффективным из-за больших сельскохозяйственных и других ущербов. Второй путь — был предложен сотрудником воднотранспортной нижегородской академии проф. Р.Д. Фроловым. Его предложение заключается в строительстве вблизи г. Нижний Новгород низконапорной плотины с водопропускным отверстием в пределах судового хода. Более того, в проекте предусмотрено строительство по верхней части этого сооружения мостового перехода. Несмотря на то, что мосты, хотя, как известно, за счёт значительного сужения дороги и создают автомобильные пробки, их отсутствие ещё более осложняет ситуацию. Поэтому, в случае реализации этого проекта решается сразу несколько важных хозяйственных проблем: увеличиваются минимальные транзитные глубины на участке Городец — Н.Новгород, увеличивается выработка электрической энергии, за счёт ликвидации холостых сбросов на ГЭС, необходимых для обеспечения судоходных глубин, уменьшаются площади затопления и подтопления сельскохозяйственных угодий и наконец ликвидируется угроза подтопления зданий в г. Н. Новгород, расположенных на низких отметках.

Однако прежде, чем принять окончательное решение необходимо рассмотреть и другие возможные варианты. В частности, строительство нескольких низконапорных ГЭС на лимитирующем участке и другие.

Для минимизации ущербов необходимо учитывать и другие негативные процессы, возникающие при строительстве водохранилищ ГЭС как в верхнем, так и в нижнем бьефах, такие как разрушение берегов водохранилищ, в верхних бьефах, местный и общий размывы русла — в нижних бьефах водохранилищ, сопровождаемые посадками уровней, что приводит к обнажению водозаборов и водовыпусков и нарушению работы судоходства. Особенно остро стоит вопрос о строительстве в нижних бьефах различных, в том числе гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий, проводимых в последующий период после строительства водохранилищ и не предусмотренных в их проектах,

Особенно острой является проблема организации разработки русловых карьеров в нижних бьефах ГЭС. Она приводит к значительному увеличению ёмкости русел и, как следствие, к дополнительным посадкам уровней. Последние приводят к значительным негативным последствиям: обнажению водозаборов и водовыпусков, разрушению опор мостов, причалов, набережных и, как следствие, к резкому уменьшению продолжительности затопления пойм, что особенно негативно сказывается на их сельскохозяйственной продуктивности в аридных зонах.

Какие же работы необходимо провести с целью минимизации гидрологических рисков при проектировании и строительстве водохранилищ ГЭС. Основными являются сбор информации и оценка экономической эффективности различных вариантов

с условием их экологической безопасности. Крайне важным является анализ вариантов строительства и эксплуатации других гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий, проектируемых и эксплуатируемых в период последующей эксплуатации ГЭС с учётом требований различных водопользователей (дорожное строительство, сельское и рыбное хозяйство, переходы трубопроводов и ЛЭП, судоходство и др.). Можно в качестве примера рассмотреть крайне не эффективное проектирование и строительство Бухтарминской ГЭС на верхнем участке р. Иртыш. Водоохранилище проектировалось на основе условия многолетнего регулирования стока. Однако оно так и не было полностью заполнено водой. В начале 60-х годов прошлого столетия обширные плодородные поймы р. Иртыш перестали затопляться и стали сначала остепняться, а затем и опустыниваться, что привело к резкому уменьшению их сельскохозяйственной продуктивности. Попуски из водоохранилища, минуя турбины, для затопления поймы, в первый год привели к существенному повышению их сельскохозяйственной продуктивности за счёт того, что, затопившая пойму волна пуска вымыла запасы гумусных частиц из пониженных участков ее рельефа и равномерно распределила их по пойме. В последующие же годы, несмотря на затопления поймы при пусках, её урожайность резко снизилась, так как вместо гумусных частиц на пойму стали поступать частицы песка, из размываемого русла в нижнем бьефе ГЭС. Для решения проблемы, с учётом того, что воды верховьев Иртыша (Чёрный Иртыш) практически полностью разбираются на орошение Китайской стороной, был ниже Бухтарминской ГЭС построен каскад других ГЭС.

Таким образом, для минимизации потерь за счёт гидрологических рисков необходимо:

- совершенствование методов расчётов как максимальных расходов воды, русловых деформаций, посадок уровней, процессов взаимодействия потоков и других характеристик, так и повышение качества исходной натурной информации;
- экспертиза проектов должна осуществляться не только гидротехниками, но и обязательно гидрологами, в том числе русловиками и экологами.

Рассмотрим гидрологические риски и пути их минимизации при проектировании и строительстве мостовых переходов.

На основе анализа картографических планово-высотных аэрофотосъёмочных и космических материалов осуществляется предварительный выбор участков расположения мостов. Как правило, выбирают три таких участка. Далее, необходимо проводить дополнительную съёмку местности, так как реки за короткий период времени, в частности при прохождении катастрофических паводков, могут весьма существенно изменять положение своего русла. После проведения дополнительных топо- геодезических, гидрологических и других работ на основе экономических расчётов с учётом экологической безопасности, осуществляется выбор основного участка расположения мостового перехода. Даже на этой стадии возникают риски за счёт неправильного обоснования выбора расчётного участка. Особенно, если учитывать российские условия (наличие лобби, давление чиновников и др.). При этом обязательным условием является, то, что дорога подводится к мосту, а не мост к дороге, так как железобетонные конструкции значительно дороже и сложнее для производства, чем земляные работы.

Следующая стадия – выбор направления оси моста. Как правило, оно выбирается нормально к динамической оси потока. При несовпадении осей руслового и пойменного потоков ось моста назначается перпендикулярно оси руслового потока, если 70% и больше максимального расхода воды расчётной обеспеченности проходит по руслу, или оси пойменного потока, если по пойме проходит 70% и более максимального расхода воды расчётной обеспеченности. Как правило, мосты под различными углами к осям руслового и пойменного потоков не строят, кроме исключительных случаев.

При этом возникают гидрологические риски за счёт ошибок в расчётах долей русловой и пойменной составляющих потока. Особенно эта проблема обострилась в последние 10-20 лет, когда наметился резко выраженный тренд повышения водности большинства рек ЕТР, что поставило под сомнение методику, рекомендованную СНиПом и основанную на условии стационарности гидрологических процессов. Какими же способами можно минимизировать гидрологические риски в этих случаях? Одним из таких путей является путь, основанный на данных натуральных наблюдений за «метками высоких вод» и сведениями о морфометрических характеристиках русел и пойм и их коэффициентах шероховатости. Эти данные позволяют получать расчётные значения максимальных расходов воды на основе методики, учитывающей эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков. При этом расчёт максимальных расходов воды осуществляется на основе графических зависимостей вида

$$V_p/V_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$$

для русловой части потока, приведённой на рис. 2 и

$$Q_n/(Q_p + Q_n) = f[F_n/(F_p + F_n); n_n/n_p; \beta]$$

для пойменной части, приведённой на рис. 3

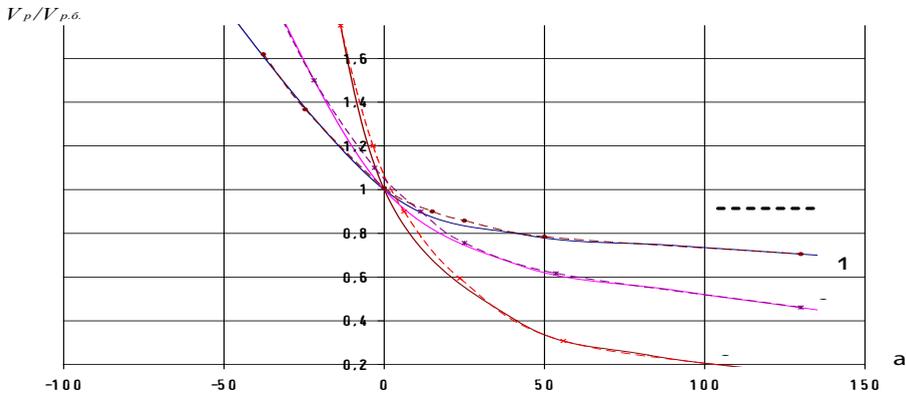


Рис. 2 – Кривые  $V_p/V_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$ . 1-  $h_p/h_{p.б.} = 1, 10$ ; 2-  $h_p/h_{p.б.} = 1.25$ ; 3 -  $h_p/h_{p.б.} = 1.50$  4. – уточнённое положение кривых

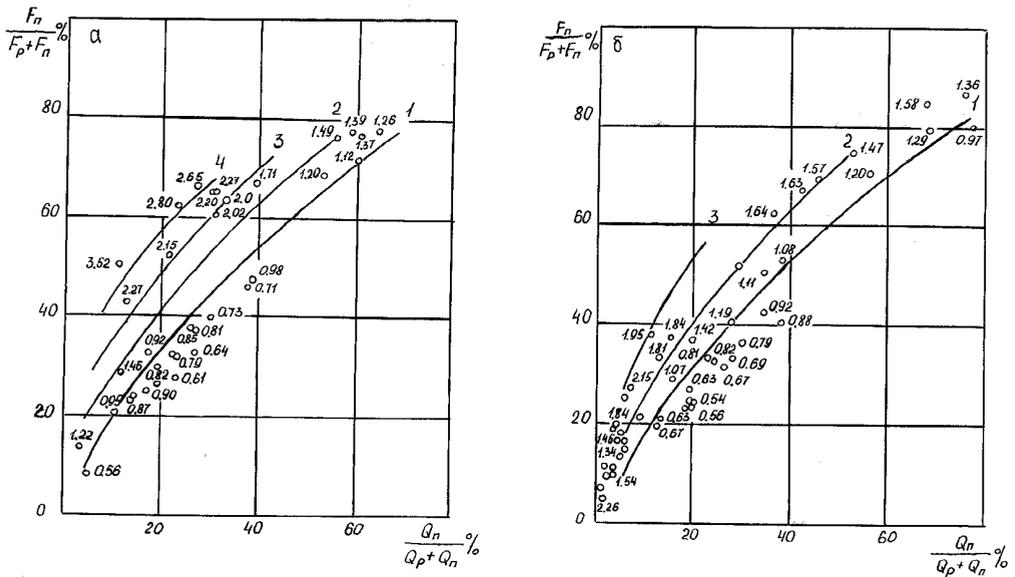


Рис. 3 - Кривые  $Q_n / (Q_p + Q_n) = f(F_n / (F_p + F_n), n_n / n_p)$ :  
 а и б - соответственно третий и второй типы взаимодействия потоков  
 Около точек значения  $n_n / n_p$ : 1 -  $n_n / n_p = 1,0$ ; 2 -  $n_n / n_p = 1,5$ ; 3 -  $n_n / n_p = 2,0$ ; 4 -  $n_n / n_p = 2,5$ .

Здесь индексы р и р.б. обозначают, что скорости руслового потока определяются при наивысших уровнях «р» или при уровнях затопления бровок прирусловых валов «р.б.». Индексы означают, что параметры относятся к русловому «р» или пойменному «п» потокам.

В данной методике учтено влияние эффекта взаимодействия потоков и допускается расчёт на основе формулы Шези только при уровне затопления бровки прируслового вала, когда этот эффект либо отсутствует, либо его влияние мало.

Следующим гидрологическим риском является выбор расчётной обеспеченности максимальных расходов воды и расчётного гидрографа стока и особенно продолжительности периода воздействия максимального расхода воды. При этом величины гидрологических рисков резко возрастают. Для их уменьшения необходимо построить по натурным данным кривые расходов воды и вспомогательные. По этим кривым определить значения максимальных расходов, соответствующие уровням 1% обеспеченности и сравнить эти данные с данными, полученными на основе статистических расчётов.

Гидротехники обычно ставят сплошную дамбу через пойму, перекрывая такой дамбой даже мощные протоки. Так на р. Амур, при строительстве автодорожного моста, были перекрыты две протоки, одна из них с расчётным расходом воды около 1000 м³/с, а другая с расходом около 700 м³/с. За счёт этого был расчищен, прилегающий к мосту участок поймы, для увеличения пропускной способности подмостового русла. В этом случае возникают гидрологические риски:

— за счёт резкого сжатия пойменного потока и направления его под различными углами в русловой поток. Так на р. Волге в 30 км выше г. Казани был построен автодо-

рожный мост. При этом дамба длиной около 5 км полностью перекрыла пойму. Когда была построена дамба и струенаправляющие сооружения, сосредоточенный поток ударил в струенаправляющее сооружение, разрушая его и разбрасывая 18-метровые металлические шпунтовые сваи. Для предотвращения полного смыва дамбы строители были вынуждены с помощью земснаряда прорыть на пойме канал, шириной 300 м и глубиной 20 – 25 метров.

Этот пример иллюстрирует просчёты при проектировании, когда не 1%, а 60% максимальный расход воды смог разрушить дамбу и струенаправляющее сооружение. Для уменьшения таких гидрологических рисков необходимы были точные натурные данные и проведение испытаний на физических моделях участков русел с поймами не только для уточнения величины пойменной составляющей, но, и что является более важным, плавного введения пойменного потока в русловую [3,4].

Особое место занимают гидрологические риски, вызванные погрешностями расчётов местного и общего размывов подмостовых русел. Известно, что около 30% аварий мостов обусловлено размывами у опор мостов. Причиной этого является несовершенство формул и методов расчётов глубин размыва подмостовых русел. Какие же пути минимизации гидрологических рисков в этих условиях. Один из них – совершенствование расчётных методов. Другой – увеличение коэффициентов запаса при строительстве этих опор. Известно, что расчётная зависимость, в частности для глубин местного размыва вида  $h_{mp} = f(h, v, k, G, k_\phi, k_k \text{ и др.})$ , является многофакторной. Более того, она осложняется в зависимости от характера грунтов (сыпучие или связные). Поэтому практически все формулы для расчётов максимальных глубин местного размыва являются эмпирическими. К тому же производство натуральных исследований осуществляется после прохождения экстремального паводка, т.е. в условиях, когда воронка размыва частично заносится, поступающими в неё наносами. Модельные же испытания из-за масштабного эффекта, эффекта пространственности и других причин приводят к результатам существенно отличающимся от натуральных.

После анализа принципов размещения активных гидротехнических сооружений на берегах и в руслах рек и разработки рекомендаций, направленных на минимизацию возможных гидрологических рисков, приведём результаты аналогичных исследований, но уже по размещению пассивных гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий. Как вытекает из таблицы (рис.1), к пассивным сооружениям в первую очередь относятся водозаборы и водовыпуски и переходы трубопроводов через реки. Это наиболее часто строящиеся и эксплуатируемые гидротехнические сооружения. Не умоляя значения других сооружений, примем за основу анализа и разработки рекомендаций эти виды сооружений, а именно водозаборы, водовыпуски и переходы трубопроводов через реки. Как указывалось, срок действия этих сооружений составляет 30-50 лет. Поэтому прогноз русловых процессов и вызываемых ими русловых деформаций должен быть составлен на этот же период. Как указывалось, при этом может быть применено одно из направлений в оценке русловых деформаций: гидроморфологическое или гидравлическое. По-видимому, в данном случае целесообразно ограничиться гидроморфологическим методом.

Главным затруднением при выборе местоположения водозаборов и водовыпусков является выбор участка с русловым процессом, не затрудняющим эксплуатацию водозабора. При этом наихудшими являются участки русел рек как с побочным типом руслового процесса, так и многорукавные русла. В первом случае, особенно в многоводные периоды скорость перемещения побочной резкой возрастает и водозабор может быть полностью занесён наносами, что приводит к необходимости его переноса, как это было на р. Обь у г. Барнаула или проведению дорогостоящих мероприятий по его защите.

Изложим рекомендации по размещению **водозаборов и водовыпусков** при различных типах русловых процессов.

### *Немеандрирующее русло с ленточными грядами*

Рекомендации по размещению: практически все сооружения в любых створах будут испытывать колебания отметок дна от подвала до гребня гряды.

Рекомендации по защите: водозаборы желательны ковшовые, неизбежны периодические расчистки русла у ковшей. Можно рекомендовать перевод наносов в безгрядовый режим, однако это требует регулирования стока воды и наносов.

### *Ограниченное меандрирование*

Определяющий фактор: размыв вогнутых берегов в ходе сползания излучин и намыв выпуклых.

Рекомендации по размещению: водозаборы и водовыпуски целесообразно располагать в низовых концах плесовых лощин.

Рекомендации по защите: при медленном сползании – укрепление берега на участке сооружения, при быстром сползании – отторжение пойменного массива (спрямление русла).

### *Свободное меандрирование*

Рекомендации по размещению: водозаборы и водовыпуски размещаются в хорошо развитых излучинах на слабдеформируемых плёсах. В слаборазвитых излучинах то же, но требуется одновременное регулируемое спрямление излучин. Необходимо крепление их вогнутого берега при затопляемых поймах, возведение поперечных земляных дамб на перекатах излучин.

### *Незавершённое меандрирование*

Определяющий фактор – стадия развития спрямления.

Рекомендации по размещению: водозаборы и водовыпуски размещаются в плёсе отмирающего рукава по рекомендациям аналогичным для свободного меандрирования.

Рекомендации по защите: стимулирование спрямлений с последующий их поддержкой креплением на входе протоки.

### *Многорукавные русла*

В случаях русловой и пойменной многорукавности сооружения размещаются в соответствии с типом руслового процесса в протоке и рекомендациями данными для этого типа.

## Переходы трубопроводов через реки

Следует отметить, что переходы трубопроводов через реки могут быть двух типов: воздушные и подводные.

К воздушным типам переходов применяются те же требования, что и к мостовым переходам, поэтому здесь рассмотрим только рекомендации по расположению подводных переходов через реки при различных типах русловых процессов.

### *Немеандрирующее русло с ленточными грядами.*

Изменения отметок дна связаны с перемещением гряд. Амплитуда колебания отметок дна равна высоте гряд.

Рекомендации по размещению: практически сооружения в любых створах будут испытывать колебания отметок дна.

Рекомендации по защите: трубопроводы должны размещаться на 1,5 м ниже отметок подвалей гряд.

### *Побочневый тип процесса*

Определяющий фактор: напозание побочней.

Рекомендации по размещению: переходы в любом месте с залеганием на глубину не менее 1,0–1,5 м ниже отметки подвалей побочней (в зависимости от класса сооружений).

### *Ограниченное меандрирование*

Определяющий фактор: размыв вогнутых берегов в ходе сползания излучин и намыв выпуклых.

Рекомендации по размещению: переходы размещаются при медленном сползании излучины на перекатах русла, при быстрых – в пределах плёсовых лощин.

### *Свободное меандрирование*

Определяющий фактор: стадия развития излучин.

Рекомендации по размещению: при всех стадиях развития излучин в точках перегиба русла (на перекатах) с залеганием ниже сезонных деформаций.

### *Незавершённое меандрирование*

Определяющий фактор: стадия развития спрямления.

Рекомендации по размещению: переходы размещаются в отмирающих рукавах близ точки перегиба русла, в спрямлениях – в зависимости от типа руслового процесса в них.

### *Многорукавные русла*

В случаях русловой и пойменной многорукавности сооружения размещаются в соответствии с типом руслового процесса в протоке и рекомендациями, данными для этого типа.

Основными недостатками при проектировании и строительстве водозаборов, водовыпусков и переходов трубопроводов является человеческий фактор, так как ошибки могут возникать:

- из-за недостатка натурной информации за последние годы;
- погрешности определения типа руслового процесса и, главное скорости его развития;

- необходимость учёта возможности «всплывания» трубопроводов, особенно при транспортировке газа;
- недостаточного учёта воздействия других гидротехнических сооружений, расположенных выше или ниже створа перехода или водозабора и водовыпуска.

Рекомендации по минимизации ущерба:

- повышение квалификации проектировщиков в области гидрологии и особенно русловых процессов;
- использование современных методов получения натурной планово-высотной и гидрологической информации;
- учёт при определении скоростей движения русловых образований, водности расчётного периода;
- освоение методики расчётов поправок к скоростям движения русловых образований за счёт водности расчётного периода.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П1385 от 02 сентября 2009 г.) по направлению «Снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф».

### Литература

1. *Барышников Н.Б.* Русловые процессы [Текст] / Н.Б. Барышников// – СПб.: изд-во РГГМУ, 2008.– 438с.
2. *Кондратьев Н.Е.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса [Текст] / И.В. Попов, Б.Ф. Снищенко // –Л.: Гидрометеиздат, 1980.— 272 с.
3. *Истомин Е.П., Слесарева Л.С.* Оценка риска экстремальных гидрометеорологических явлений [Текст] / Е.П. Истомин, Л.С. Слесарева // –СПб.: Ученые записки, РГГМУ, №16, 2010.– с.14-22.
4. *Векшина Т.В.* Гидрологические сопротивления рек, зарастающих растительностью [Текст] / Т.В. Векшина // –СПб.: Ученые записки, РГГМУ, №15, 2010.– с.19-27.

*А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая, А.А. Ошуркова*

## **ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ИМПУЛЬСАМИ КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

*A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Y.B. Rzhonsnitskaya, A.A. Oshurkova*

## **LIDAR PROBING OF ATMOSPHERIC AEROSOL POLLUTIONS BY INTEGRAL METHODS USING FINITE DURATION PULSES**

*рассматриваются методы лидарного зондирования атмосферы импульсами конечной длительности. разработан новый интегральный метод лидарных измерений оптических характеристик атмосферного аэрозоля и оценки точности их определения в условиях неоднородной атмосферы.*

*Ключевые слова: обратное рассеяние, ослабление, многопозиционные измерения, импульсы конечной длительности, лидарное уравнение, интегральное решение.*

*There are considered lidar probing methods for atmospheric measurements using finite duration pulses. New integral lidar multiposition technique was developed to measure the aerosol pollutions and to assess the accuracy of the measurements results in inhomogeneous atmosphere conditions.*

*Key words: backscattering, extinction, multiposition lidar measurements, finite duration pulses, lidar equation, integral solution*

Для осуществления дистанционных измерений перспективными является методы лидарного зондирования. Однако при применении методов лидарного зондирования необходимо решить проблемы неопределенности и математической некорректности. Кроме того, в условиях неоднородной атмосферы, низкой прозрачности воздуха необходим учет конечной длительности лазерных импульсов.

В этой связи в работе рассматриваются интегральные методы многопозиционно-го лидарного зондирования атмосферы.

### **Интегральные методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля импульсами конечной длительности**

Методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля основаны на измерении мощности эхо сигнала  $P$ , связанной лидарным уравнением с показателем ослабления и показателем обратного рассеяния:

$$P(r) = \frac{2A}{c\tau} \int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta(r') \exp\left(-2 \int_0^{r'} \sigma(r'') dr''\right) dr', \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние между лидаром и рассеивающим объемом,  $f = K(\vec{r}_j - \vec{R}_i)^{-2}$  – геометрический фактор лидара,  $K$  – коэффициент заполнения,  $A$  – постоянная лидара,  $\beta$  – коэффициент обратного рассеяния,  $\sigma$  – коэффициент ослабления,  $c$  – скорость света,  $\tau$  – длительность зондирующего импульса.

Уравнение (1) отличается от обычно используемого уравнения, т.к. содержит длительность зондирующего импульса. С учетом малости длительности зондирующего импульса с точностью до членов первого порядка малости лидарное уравнение (1) можно заменить разложением в ряд, ввести соответствующий скорректированный на геометрический фактор эхо сигнал и предложить дифференциальное решение задачи [1]. Однако из-за математической некорректности этой задачи целесообразен другой путь ее решения.

Уравнение (1) можно решать методом последовательных приближений. Коэффициент обратного рассеяния  $\beta_0$  и коэффициент ослабления  $\sigma_0$  в нулевом приближении находятся на основании многопозиционного интегрального решения [2] лидарного уравнения, записанного в приближении короткого зондирующего импульса

$$S_0(r) = Af(r)\beta_0(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma_0(r') dr'\right), \quad (2)$$

где

$$S_0(r) = \frac{P(r)}{f(r)}. \quad (3)$$

В первом приближении коэффициенты  $\beta_1, \sigma_1$  находятся на основании многопозиционного интегрального решения лидарного уравнения

$$S_1(r) = Af(r)\beta_1(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma_1(r') dr'\right), \quad (4)$$

где

$$S_1(r) = \frac{c\tau P(r)\beta_0(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma_0(r') dr'\right)}{2 \int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta_0(r') \exp\left(-2 \int_0^{r'} \sigma_0(r'') dr''\right) dr'}. \quad (5)$$

Аналогичным образом можно рассмотреть следующие приближения. Для  $l+1$ -го приближения получается:

$$S_{l+1}(r) = Af(r)\beta_{l+1}(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma_{l+1}(r') dr'\right), \quad (6)$$

$$S_{l+1}(r) = \frac{c\tau P(r)\beta_l(r)\exp\left(-2\int_0^r \sigma_l(r')dr'\right)}{2\int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta_l(r')\exp\left(-2\int_0^{r'} \sigma_l(r'')dr''\right)dr'}. \quad (7)$$

Сравнение найденных решений с решением в нулевом приближении дает возможность оценить систематическую погрешность использования лидарного уравнения, записанного в приближении короткого зондирующего импульса. При этом следует учитывать малую длительность импульсов, посылаемых в атмосферу применяемыми устройствами [3-5]. В соответствии с этим, предлагается упрощенный подход к оценке систематической погрешности. Систематическую погрешность определения коэффициента обратного рассеяния  $\beta$  и коэффициента ослабления  $\sigma$  при использовании соотношений (2), (3) можно оценить по разности решений уравнений (2), (4):

$$\begin{aligned} \delta_\beta &= \beta_0 - \beta_1, \\ \delta_\sigma &= \sigma_0 - \sigma_1. \end{aligned} \quad (8)$$

При этом интеграл в знаменателе выражения (5) можно вычислить методом трапеций:

$$\begin{aligned} &\int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta_0(r')\exp\left(-2\int_0^{r'} \sigma_0(r'')dr''\right)dr' = \\ &= \left\{ f(r)\beta_0(r)\exp\left(-2\int_0^r \sigma_0(r')dr'\right) + f\left(r+\frac{c\tau}{2}\right)\beta_0\left(r+\frac{c\tau}{2}\right)\exp\left(-2\int_0^{r+\frac{c\tau}{2}} \sigma_0(r')dr'\right) \right\} \frac{c\tau}{4}. \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку в первом приближении

$$\begin{aligned} f\left(r+\frac{c\tau}{2}\right) &= f(r) + f'(r)\frac{c\tau}{2}, \\ \beta_0\left(r+\frac{c\tau}{2}\right) &= \beta_0(r) + \beta_0'(r)\frac{c\tau}{2}, \\ \exp\left(-2\int_0^{r+\frac{c\tau}{2}} \sigma_0(r')dr'\right) &= \exp\left(-2\int_0^r \sigma_0(r')dr'\right)[1 - c\tau\sigma_0(r)], \end{aligned} \quad (10)$$

выражение (9) преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} &\int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta_0(r')\exp\left(-2\int_0^{r'} \sigma_0(r'')dr''\right)dr' = \\ &= \left\{ f(r)\beta_0(r)\exp\left(-2\int_0^r \sigma_0(r')dr'\right) \right\} \left[ 1 + \left( \frac{d \ln f}{dr} + \frac{d \ln \beta_0}{dr} - 2\sigma_0 \right) \frac{c\tau}{4} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом равенства (11) выражение (5) можно переписать в виде:

$$S_1(r) = \frac{P(r)}{f(r)} \left[ 1 - \left( \frac{d \ln f}{dr} + \frac{d \ln \beta_0}{dr} - 2\sigma_0 \right) \frac{c\tau}{4} \right]. \quad (12)$$

В данном приближении результаты применения рассматриваемого метода и метода работы [1] совпадают.

**Результаты лидарного зондирования импульсами конечной длительности аэрозоля неоднородной атмосферы**

Для описания оптических параметров на основе данных [2] была использована степенная связь между коэффициентом ослабления и коэффициентом обратного рассеяния:

$$\beta = D\sigma^{1/m}. \quad (13)$$

Учитывалось существование физических причин, способствующих образованию в атмосфере горизонтально однородных слоев. Решение системы интегральных уравнений на трассах зондирования позволяет найти коэффициент ослабления, коэффициент обратного рассеяния, степенную связь и их погрешности. Для определения параметров погрешности минимизируются. Таким образом, связь между коэффициентами обратного рассеяния и ослабления была найдена посредством решения лидарного уравнения в терминах Клетта для различных направлений зондирования и зондируемых слоев. Средние квадратичные отклонения были рассчитаны для слоев с границами в пределах 200-600 м [2].

Используя найденные величины и интегральное решение лидарного уравнения, можно восстановить профили коэффициентов обратного рассеяния и ослабления.

На рис. 1 представлены вертикальные профили коэффициента ослабления и коэффициента обратного рассеяния, определённые по этим лидарным данным.

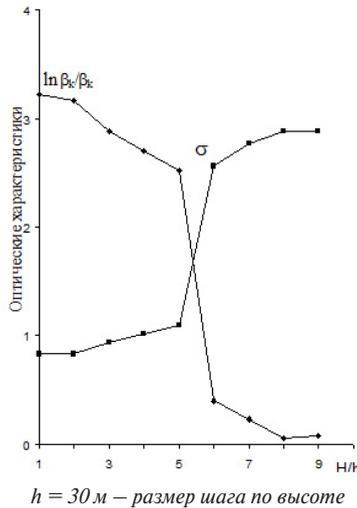
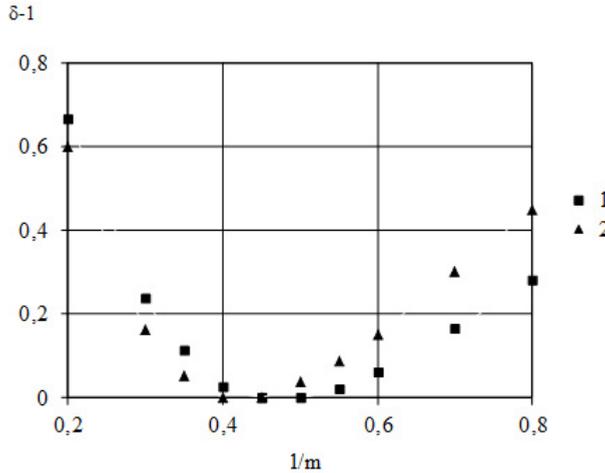


Рис. 1 — Вертикальные профили коэффициента ослабления коэффициента обратного рассеяния

На рис. 2 и в таблице 1 представлены средние квадратичные отклонения  $\delta$  (за вычетом минимального) для различных пар углов места и зондируемых слоёв с учетом и без учета длительности импульса. Представленные результаты учитывают всю совокупность поправок равенства (12). Минимумы кривых, построенные с учетом и без учета длительности импульса, находятся в точках: 0,5 и 0,45, соответственно. Таким образом, погрешность величины  $m$ , связанная с конечностью длительности импульса для данных работы [2] составляет 10%.



1 - с учетом длительности импульса, 2- без учета длительности импульса  
 Рис. 2 – Среднее квадратичное отклонение решений интегрального уравнения по совокупности направлений зондирования и зондируемых слоев

Таблица 1

Среднее квадратичное отклонение решений интегрального уравнения

1/m	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
( $\delta-1$ )1	0,239	0,114	0,025	0,001	0,000	0,021	0,061
( $\delta-1$ )2	0,162	0,053	0,001	0,000	0,036	0,087	0,151

### Заключение

В работе проанализированы интегральные методы интерпретации данных многопозиционного лидарного зондирования неоднородной атмосферы и найдено новое итерационное решение задачи, учитывающее конечную длительность зондирующего импульса. Найденное решение позволяет повысить точность определения характеристик аэрозольных загрязнений неоднородной атмосферы лидарными системами.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П1037 от 31 мая 2010 г.) по направлению «Физика атмосферы»

### Литература

1. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Суворов А.П.* Зондирование атмосферы импульсами конечной длительности // Седьмая международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 2010, с.30.
2. *Yegorov A.D.* Atmospheric aerosols measurements and reliability problem [Text] / A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Yu.B. Rzhonsnitskaya // International Journal of Remote Sensing, 2008, v.29, 2449 – 2468.
3. *Muller, D., Ansmann, A., Mattis, I., Tesche, M., Wandinger, U., Althausen, D., and Pisani, G.* Aerosol type dependent lidar-ratio observed with Raman lidar. J. Geophys. Res., 112(D16202):doi:10.1029/2006JD008292, 2007.
4. *Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I., Shimizu A., Liu X., Zhang Y., Li R., Liu J.*, 2010: Vertical distribution of water-soluble, sea salt, and dust aerosols in the planetary boundary layer estimated from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar measurements in Guangzhou and Beijing, China, Atmospheric Research 96, pp. 602-611.
5. *Omar A., Winker D., Kittaka C., Vaughan M., Liu Z., Hu Y., Trepte C., Rogers R., Ferrare R., Lee K. P., Kuehn R., and Hostetler C.*, “The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm,” J. Atmos. Oceanic Technol., vol.26, pp. 1994-2014, 2009.

*О.П. Боровская, П.А. Блаkitная, С.П. Смышляев, В.Я. Галин, Е.И. Хорева*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ В БУДУЩЕМ**

*O.P. Borovskaya, P.A. Blakitnaya, S.P. Smyshlyayev, V.Ya. Galin, E.I. Khoreva*

## **MODELING OF THE COUPLED ATMOSPHERIC TEMPERATURE AND CHEMICAL COMPOSITION VARIABILITY IN FUTURE**

*Выполнены модельные эксперименты с глобальной химико-климатической моделью с целью исследования одновременных и взаимосвязанных изменений содержания озона и температуры стратосферы в будущем. Результаты проведенных экспериментов показали, что охлаждение стратосферы может оказаться решающим фактором, определяющим межгодовую изменчивость содержания озона. Этот фактор становится доминирующим в 2000-х годах, что может способствовать более быстрому восстановлению содержания озона при сокращении выбросов фреонов и галлонов.*

*Ключевые слова: газовый состав, атмосфера, температура, моделирование, сценарии будущих изменений*

*Numerical experiments with a chemistry-climate model have been done to study simultaneous and coupled gaseous composition and temperature in the stratosphere in future. Model results demonstrated that stratospheric cooling would be key factor for future year to year changes in ozone composition. This factor is supposed to be even more important in 2000 years and cause more rapid ozone recovery due to CFC emissions restrictions.*

*Key words: gaseous composition, atmosphere, temperature, modeling, scenarios of future variability*

Содержание атмосферного озона после существенного глобального сокращения в конце XX века с середины 90х годов начало увеличиваться и почти восстановилось до уровня 70х годов к началу XXI века [1]. Это восстановление содержания озона многими политиками стало трактоваться как демонстрация успеха Монреальского Протокола и его уточнений, ограничивающих выброс в атмосферу фреонов и галлонов [2]. Однако содержание озона в стратосфере контролируется не только содержанием хлорных и бромных газов, но также и другими природными и антропогенными факторами, такими как температура стратосферы, атмосферная динамика, солнечная активность и вулканические выбросы [3]. В ряде исследований было показано, что резкое уменьшение содержания озона к середине 90-х годов, так же как и его последующее быстрое восстановление, в большей степени объясняются сочетанием сильного аэрозольного загрязнения, характерного для того периода времени, минимума одиннадцатилетнего цикла солнечной активности и охлаждения нижней стратосферы, чем увеличением, а потом стабилизацией содержания хлорных и бромных

газов [4]. При этом одним из наиболее существенных факторов, влияющим на скорость восстановления озона, является температура стратосферы [5].

Наблюдаемое охлаждение стратосферы может быть связано, как с уменьшением ее нагрева из-за сокращения содержания озона, так и с увеличением содержания парниковых газов, которые, способствуя нагреву приземной атмосферы, приводят к охлаждению стратосферы, и, наконец, с изменениями динамических условий переноса тепла [6]. Эти факторы создают предпосылки для образования обратных связей между содержанием малых газов и температурой стратосферы. Таким образом, для учета обратных связей при анализе будущих изменений содержания озона целесообразно использовать объединенные модели газового состава, позволяющие рассчитывать концентрации атмосферных газов в зависимости от температуры и скоростей ветра, и общей циркуляции атмосферы, нацеленные на расчет температуры и скоростей ветра в зависимости, в том числе, от содержания малых газов атмосферы.

Целью настоящей работы является исследование изменений содержания озона и температуры нижней стратосферы в течение первой четверти XXI века. Модельное прогностическое исследование может быть репрезентативным, если используемые для него модели способны воспроизводить наблюдаемые в прошлом и настоящем изменения исследуемых параметров. Поэтому на первом этапе настоящей работы проводилось исследование степени взаимного влияния изменений климата и газового состава в 1960-2005 годах. Если модель способна воспроизводить подобные изменения, то на следующем этапе можно ее использовать для осуществления прогноза возможности влияния выбросов парниковых газов и хлорфторуглеводородов на температуру и содержание озона в будущем. Помимо антропогенных факторов на изменения температуры и содержания озона могут оказать влияние солнечная активность и изменения содержания стратосферного аэрозоля, поэтому исследование воздействия изменчивости содержания хлорных и бромных газов на содержание озона необходимо проводить на фоне прояснения вопроса о возможности влияния естественной изменчивости радиационного режима и газового состава атмосферы на будущую изменчивость температуры и содержания озона.

Некоторые атмосферные газы, такие как метан и водяной пар, а также аэрозоль имеют потенциал воздействия как на содержание озона и других газов, так и на температуру, поэтому и изменение содержания этих газов в будущем может оказать неочевидное воздействие на температуру и содержание озона из-за появления возможных обратных связей [7]. Изменение температурных условий может оказать воздействие не только на содержание сульфатного аэрозоля, но и на формирование и эволюцию полярных стратосферных облаков [8]. Возникающие из-за этого обратные связи могут повлиять на долгопериодную изменчивость содержания озона в полярных районах и процессы формирования полярных «озоновых дыр». Кроме того, будущие изменения содержания водяного пара в результате повышения содержания метана могут повлиять как на интенсивность химических процессов, так и на изменение радиационных свойств стратосферы с последующими изменениями динамики атмосферы [9], которая, в свою очередь, может повлиять на межгодовую изменчивость как температуры, так и содержания озона.

### Описание используемой модели

Используемый комплекс моделей, объединенных в химико-климатическую модель (ХКМ) [10], охватывает высотный диапазон от земной поверхности до 90 км с переменным шагом по высоте. Из общего количества 39 вертикальных  $\sigma$ -уровней 14 приходится на тропосферу. В стратосфере и мезосфере шаг по высоте составляет около 3 км. В горизонтальном направлении ХКМ охватывает весь земной шар с равномерными шагами по широте (4 градуса) и по долготе (5 градусов). В динамической части модели уравнения гидротермодинамики атмосферы, записанные в адвективной форме, решаются конечно-разностным методом с применением полунейвной схемы расчета [11].

Прогностическими переменными в модели общей циркуляции атмосферы кроме горизонтальных скоростей являются температура, удельная влажность и приземное давление. В радиационном блоке модели применяется метод Дельта-Эдингтона для расчета притоков тепла к атмосферным слоям [12]. При этом перенос коротковолнового солнечного излучения рассчитывается, начиная с длины волны 200 нм. В полосах поглощения озона в интервале 200–700 нм рассматриваются 8 спектральных участков из 18, принятых в модели. Эффекты нарушения локального термодинамического равновесия в мезосфере в модели не рассматриваются.

Химическая часть модели учитывает изменчивость 74 основных газовых составляющих, прямо или косвенно влияющих на скорости нагрева атмосферы [13]. В модели учитываются реакции кислородного, водородного, азотного, хлорного, бромного и серного циклов, что позволяет рассматривать влияние химических процессов на образование и эволюцию как озона и влияющих на него газов, так и атмосферного сульфатного аэрозоля. Количество и тип учитываемых фотохимических реакций позволяет исследовать изменчивость основных влияющих на озон газов, как в стратосфере, так и в тропосфере и мезосфере [14].

Система уравнений переноса отношений смеси атмосферных газовых примесей с учетом фотохимического взаимодействия в совместной трехмерной модели решается для тридцати долгоживущих составляющих и пяти семейств (кислородного, азотного, хлорного, бромного и серного). Для газов, химическое время жизни которых существенно меньше характерного временного масштаба атмосферного переноса, в модели решается система жестких уравнений без учета их переноса атмосферной циркуляцией.

Если для решения уравнений переноса долгоживущих примесей используется алгоритм динамической модели, то для жестких уравнений в химической части модели применяются самостоятельные, так называемые А-устойчивые методы решения жестких систем, когда решения на явном и неявном шаге берутся с разными весовыми коэффициентами.

Алгоритм совместной модели составлен таким образом, чтобы учитывать взаимодействие между химическими и физическими процессами на каждом модельном шаге по времени. На первом этапе временного шага вычисляются потоки солнечной радиации по всей толще атмосферы в каждой географической точке для данного сезона и времени суток. При вычислении данных потоков учитывается текущее расчетное содержание озона в выше и нижележащих слоях атмосферы, а также рассеяние света молекулами и аэрозолем. Для расчета переноса излучения в атмосфере используется методика, основанная на применении модифицированной схемы Дельта-Эдингтона

в коротковолновой части солнечного спектра. Вычисленные радиационные потоки используются далее для расчета скоростей фотодиссоциации атмосферных газов, которые учитываются в химическом блоке модели для вычисления скоростей фотохимической продукции и разрушения рассчитываемых газов. При этом для оценки констант скоростей химических реакций используются вычисленные в динамическом блоке модели значения температуры атмосферы.

Значения скоростей фотохимической продукции вместе с вычисленными в динамическом блоке модели скоростями атмосферного переноса массы используются затем для моделирования эволюции радиационно- и химически активных долгоживущих атмосферных газов. Одновременно вычисляются концентрации короткоживущих атмосферных газов путем решения уравнений химической кинетики без учета атмосферного переноса массы. Шаги по времени в динамическом и химическом блоках модели синхронизируются (12 минут), в связи с чем при расчете концентраций химически активных газов автоматически учитывается суточный ход.

Рассчитанные таким образом концентрации озона используются далее для вычисления потоков солнечной радиации и уходящего длинноволнового излучения, которые учитываются в динамическом блоке модели для вычисления изменчивости температуры и скоростей ветра в нижней и средней атмосфере. Оцененные таким образом концентрации атмосферных газов, значения температуры и ветра инициируют следующий временной шаг совместной модели. В результате процесс взаимодействия химических и физических процессов переходит на следующий временной слой и моделирование временной и пространственной изменчивости содержания атмосферных газов и температуры продолжается в соответствии с описанными выше этапами.

Таким образом, взаимодействие между моделями осуществляется на каждом временном шаге путем использования рассчитанных в МОЦА скоростей ветра и температуры при моделировании переноса газовых примесей и скоростей химических реакций в МГС и, с другой стороны, путем использования рассчитанных в МГС значений содержания озона для оценки скоростей нагрева и выхолаживания атмосферы в МОЦА, влияющих на изменения температуры и ветра в атмосфере.

Важнейшую роль в фотохимических процессах в стратосфере и тропосфере играют гетерогенные процессы на поверхности атмосферных аэрозолей и полярных стратосферных облаков (ПСО) [14]. Роль гетерогенных процессов для баланса атмосферных малых газов заключается, во-первых, в поглощении газов при столкновениях с аэрозолем и ПСО, что приводит к дополнительному стоку химических составляющих, а, во-вторых, в образовании новых газов в поверхностных химических реакциях, отличных от происходящих в газовой фазе. В подобных реакциях аэрозоль выполняет роль катализатора, способствуя осуществлению химических реакций, которые или невозможны, или медленны в газовой фазе. Для учета подобных процессов в совместной модели используется специально разработанный термодинамически-микрофизический блок эволюции сульфатного аэрозоля и ПСО.

При разработке этого блока использовалось комбинирование рассмотрения термодинамических процессов фазовых переходов и микрофизики распределения частиц по размерам и их гравитационного осаждения. Основное предположение заключается в том, что частицы полярных стратосферных облаков образуются на основе

существующего в стратосфере сульфатного аэрозоля в результате поглощения паров азотной кислоты и водяного пара. В результате образуется тернарный аэрозоль, состоящий из водяного пара, серной и азотной кислот. Это предположение подтверждается результатами измерений, показывающими, что при низких температурах полярной ночи количество частиц в единице объема остается практически таким же, каким оно было до наступления полярной ночи, однако их размеры увеличиваются. Изменение состава и объема тернарного аэрозоля, а также газовый остаток водяного пара, паров азотной и серной кислоты рассчитывался в зависимости от температуры и общего объемного содержания  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HNO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Для исследования дальнейшей эволюции тернарного аэрозоля и вычислений площади его поверхности вводилось логнормальное распределение аэрозоля по размерам, на основании экспериментальных данных. Основываясь на результатах измерений, демонстрирующих, что при образовании полярных стратосферных облаков число частиц в единице объема остается таким же, каким было число частиц сернокислотного аэрозоля, а их размер увеличивается, в разработанном блоке ПСО не рассматривались микрофизические процессы образования новых частиц, а предполагалось, что происходит изменение среднего радиуса аэрозоля за счет конденсации и испарения той части объема аэрозоля, которая превышает насыщающие значения. В разрабатываемой модели, где рассмотрение эволюции полярных стратосферных облаков необходимо только для оценки степени их влияния на концентрации озона и связанных с ним газов, а изучение микрофизических процессов не является основной целью, такой подход позволяет учесть изменчивость площади поверхности аэрозоля, не внося сильных усложнений и без того сложную модель химии и динамики атмосферы. Кроме того, данный метод позволяет промоделировать процессы денитрификации и дегидратации полярной атмосферы, т.к. при увеличении среднего радиуса частиц происходит увеличение скоростей гравитационного осаждения, которые рассчитывались в зависимости от радиуса и плотности аэрозольных частиц, и процесс денитрификации интенсифицируется.

Для определения направления эволюции частиц ПСО учитывались не только температура и содержание водяного пара и азотной кислоты в данной точке пространства, но и температурная история частиц аэрозоля. Если частицы в предыдущие моменты времени находились в условиях низких температур, то крупный аэрозоль может находиться в твердой фазе, что при соответствующих термодинамических условиях может привести к образованию ПСО, состоящих из твердых азотосодержащих частиц. Если при тех же температурных условиях в предыдущей истории частиц не было достаточно низких температур, то аэрозоль будет находиться в виде жидких тернарных частиц. Подобный подход позволил, во-первых, объяснить причины наблюдаемого факта, почему ПСО не отмечаются при одинаковых температуре и содержании водяного пара и азотной кислоты в одних географических условиях, а отмечаются в других, где температура может быть даже выше. В частности, в северном полушарии температуры около 190 К отмечаются значительно реже, чем в южном полушарии, что приводит к значительно менее частым появлениям ПСО-1 в северном полушарии чем в южном, даже при достижении температур ниже насыщенного состояния азотной кислоты.

Скорости гетерогенных химических реакций в атмосфере рассчитывались, во-первых, в зависимости от площади поверхности аэрозоля и ПСО, во-вторых, от скорости теплового движения молекул, которая оценивалась по формуле Максвелла в зависимости от температуры воздуха и молекулярного веса газа и, в-третьих, от вероятности прохождения гетерогенной при реакции при попадании газовой молекулы на поверхность аэрозоля или ПСО. Последний параметр для известных гетерогенных реакций в зависимости от типа поверхности аэрозоля и ПСО заимствовался из JPL-2005 [2].

### Методология модельных экспериментов

Для исследования одновременных изменений газового состава и температуры атмосферы в будущем было проведено несколько серий численных экспериментов с химико-климатической моделью (ХКМ) нижней и средней атмосферы [14], объединяющей в единый комплекс модели газового состава [13] и общей циркуляции атмосферы [12].

На первом этапе модельных экспериментов ХКМ использовалась для расчета начальных условий для эволюционного расчета. Для этого модель запускалась на период с 1970 по 1979 год и при этом инициировалась температурой поверхности океана, процентным покрытием льдом и содержанием сульфатного аэрозоля, соответствующими 1979 году, на основании данных эксперимента АМИП-2 [12], повторяющимися от года к году. При этом поверхностные выбросы атмосферных газов задавались в соответствии со сценариями ВМО-2006 [1] и менялись от года к году. Начиная с 1979 года наряду с по-прежнему меняющимися от года к году поверхностными потоками атмосферных газов добавлялась межгодовая изменчивость температуры поверхности океана и процентного покрытия льдом в соответствии с данными эксперимента АМИП-2, а также изменчивость содержания стратосферного аэрозоля по результатам спутниковых измерений прибором SAGE-2 [13], отражающими влияние вулканических выбросов на аэрозольное загрязнение атмосферы. Влияние солнечной активности на изменчивость потоков солнечной радиации учитывалось на основании данных о количестве солнечных пятен и об изменчивости потоков в различных спектральных диапазонах при изменении солнечной активности от минимума к максимуму по результатам спутниковых измерений UARS [11].

На следующем этапе модельных экспериментов проводились расчеты, нацеленные на исследование степени взаимного влияния изменений климата и газового состава в прошлом и настоящем. Период расчетов охватывал 1979-2003 годы. Поверхностные концентрации газов, имеющих наземный источник, таких как углекислый газ, метан, закись азота, хлорфторуглеводороды и углеводороды, по-прежнему задавались на основании данных ВМО-2006, солнечная активность – по данным наблюдений за числом солнечных пятен, площадь поверхности сульфатного аэрозоля – по результатам спутниковых наблюдений SAGE-2, а температура поверхности океана и процентное покрытие океана льдом – по данным АМИП. Отличие от первой серии экспериментов заключалось в том, что все эти параметры изменялись от года к году, что позволило оценить влияние этих факторов на межгодовую изменчивость содержания озона и температуры стратосферы. Целью экспе-

римента было определение причин наблюдаемых изменений и степени взаимного влияния изменений температуры и содержания озона. Для этого были выполнены расчеты, в которых фиксировалось влияние различных, влияющих на озон факторов, на уровне 1979 года.

В следующей серии модельных экспериментов исследовались будущие изменения содержания озона и температуры стратосферы. Расчеты выполнялись для периода с 2001 по 2020 годы. Период с 2001 по 2008 годы относился к настоящему времени, в течение которого результаты расчетов можно было сравнить с результатами наблюдений. В первом модельном эксперименте расчеты изменения содержания озона в течение исследуемого периода выполнялись в предположении сохранения температуры стратосферы на уровне 2000 года, т.е. без учета обратных связей между изменениями температуры и содержания озона. Целью этого эксперимента было оценить влияние изменения содержания хлорных и бромных газовых составляющих в соответствии с требованиями Монреальского Протокола, которые учитывались в базовом сценарии ВМО, на ожидаемое восстановление содержания озона без учета одновременного возможного изменения температуры стратосферы.

Дальнейшие эксперименты выполнялись с учетом обратных связей между изменениями газового состава и температуры стратосферы. В базовом эксперименте изменения температуры рассчитывались под воздействием межгодового изменения температуры поверхности океана и площади покрытия льдом поверхности океана по данным Британского HadleyCenter (<http://www.hadobs.org/>) для 2001-2007 годов и фиксировались на уровне 2007 года для последующего периода. Изменение солнечной активности рассчитывалось по результатам измерений числа солнечных пятен и опять фиксировалось на уровне 2007 года для последующего периода. Изменение газовых составляющих атмосферы управлялось поверхностными потоками газов, имеющих поверхностный источник, в соответствии с данными ВМО, которые включают сценарии изменчивости вплоть до 2100 года с учетом требований Монреальского Протокола и Киотской Конвенции. Изменения парниковых газов, в соответствии с этими данными, влияло также и на изменения температуры атмосферы. Изменение содержания сульфатного аэрозоля до 2005 года задавалось по данным спутниковых измерений SAGE-2, а в последующий период рассчитывалось на основе данных 2005 года с учетом термодинамической корректировки в зависимости от изменений температуры стратосферы.

Помимо базового эксперимента были выполнены также расчеты по дополнительным сценариям, нацеленным на исследование чувствительности изменения температуры и содержания озона к вариациям влияющих факторов. В первом дополнительном эксперименте содержание углекислого газа фиксировалось на уровне 2005 года. Тем самым исследовалось, в какой степени влияние выбросов парниковых газов может оказать воздействие на изменение температуры стратосферы с последующим влиянием на скорости химических реакций, определяющие изменение содержания атмосферного озона. Во втором дополнительном эксперименте содержание аэрозоля фиксировалось на уровне 2005 без учета его изменения при вариациях температуры стратосферы. Тем самым исследовалось влияние гетерогенных реакций на поверхности сульфатного аэрозоля на межгодовую изменчивость содержания озона.

В третьем дополнительном эксперименте изменение содержания метана фиксировалось на уровне 2005 года с целью исследования влияния этого газа как на содержание водяного пара, что должно быть связано как с влиянием на радиационный режим и фотохимию атмосферы, так и напрямую на химию атмосферы, т.к. метан способствует образованию озона и некоторых водородных газов в атмосфере.

### Результаты модельных расчетов

На рис. 1 приведены результаты моделирования межгодовой изменчивости общего содержания озона, осредненного для неполярных районов в течение 1979-2005 годов. Сравнение результатов расчетов с наблюдениями показывает в целом хорошее соответствие, что говорит о том, что совместная химико-климатическая модель может быть использована как для анализа причин наблюдаемых изменений содержания озона в прошлом и настоящей, так и для прогноза его изменчивости в будущем.

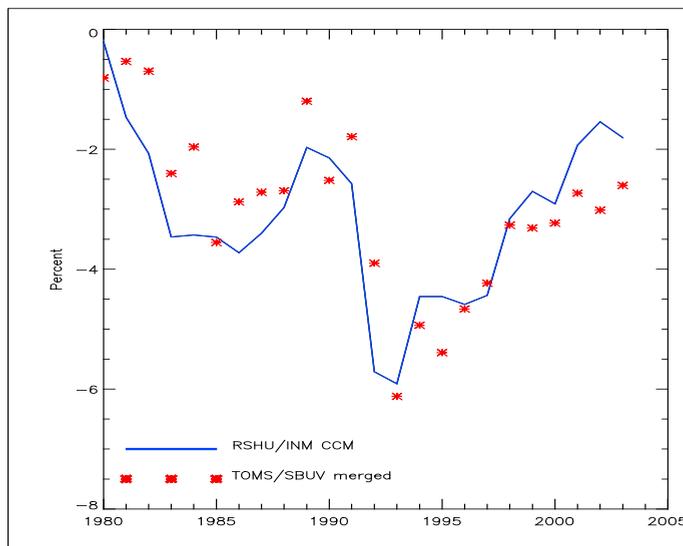


Рис. 1 – Изменение общего содержания озона по отношению к уровню 1979 года по результатам моделирования с химико-климатической моделью (сплошная линия) и спутниковых измерений (звездочки)

На рис. 2 приведены результаты расчетов изменения содержания озона в тот же период по сценариям с фиксированным воздействием различных озонотворяющих факторов. При воздействии только выбросов хлорсодержащих фреонов и бромсодержащих галлонов (синяя линия) можно отметить, что, во-первых, глобальное сокращение содержания озона составляет 2-2.5% в минимуме, а не 5-6% как показывали предварительные оценки, а, во-вторых, что восстановление озона с середины 90-х годов не связано с действием Монреальского Протокола, т.к. без учета влияния других факторов можно говорить только о некоторой стабилизации содержания озона к концу XX века и слабой тенденции к восстановлению в начале 2000х годов (синяя линия).

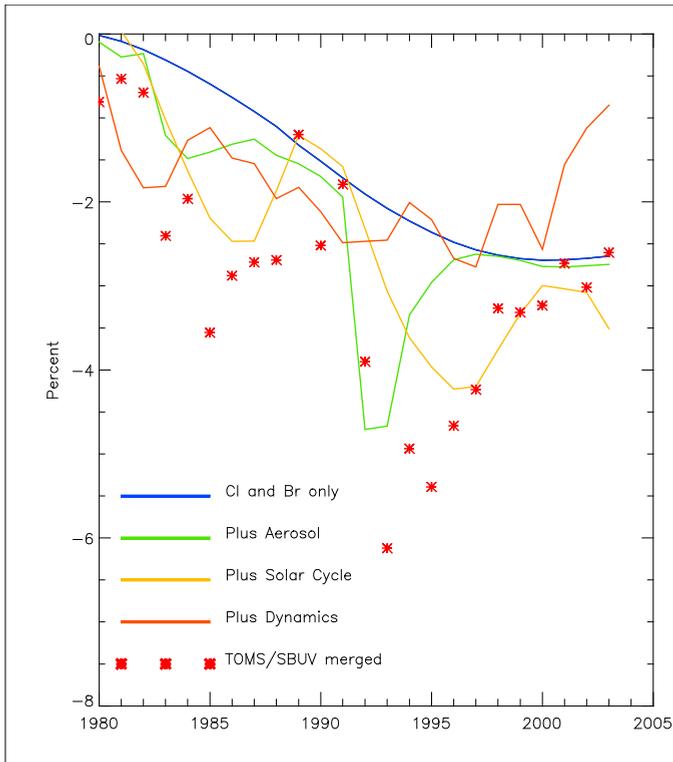


Рис. 2 – Изменение общего содержания озона по отношению к уровню 1979 года при фиксированных озонотормозящих факторах

Первая половина 90-х годов характеризуется совпадением понижающего действия на озон содержания аэрозоля (зеленая линия), солнечной активности (желтая линия) и антропогенных выбросов фреонов и галлонов (синяя линия). Совокупное действие этих факторов и привело к резкому уменьшению глобального содержания озона в этот период. Во второй половине 90-х годов содержание аэрозоля, а затем и солнечная активность начинают действовать в сторону повышения содержания озона, к чему добавляется динамический фактор (оранжевая линия), связанный с изменением температуры, т.е. с охлаждением стратосферы. Этот фактор становится доминирующим в 2000-х годах (оранжевая линия), что может способствовать более быстрому восстановлению содержания озона при сокращении выбросов фреонов и галлонов.

На рис. 3 показано расчетное изменение температуры нижней стратосферы в сравнении с данными наблюдений. Модель воспроизводит охлаждение стратосферы, однако во второй половине 90-х годов она демонстрирует некоторое восстановление температуры, связанное, по-видимому, с реакцией на увеличение содержания озона, что должно приводить к увеличению нагрева стратосферы. Однако результаты измерений показывают дальнейшее охлаждение, что говорит том, что озонный фактор не является здесь преобладающим.

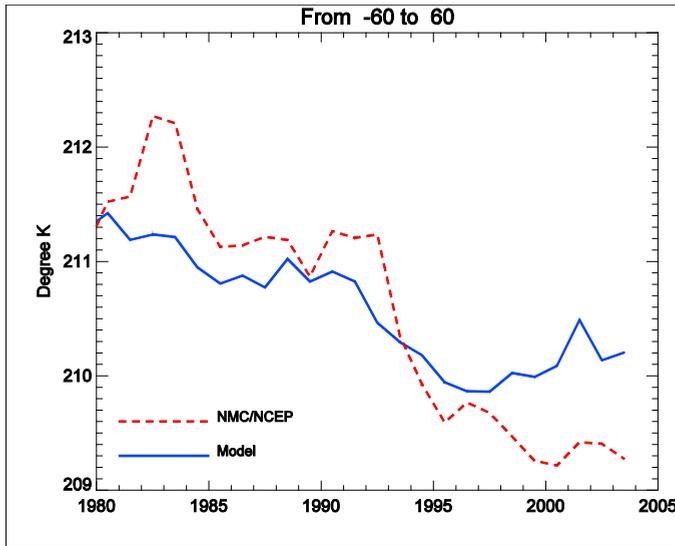


Рис. 3 – Изменение температуры нижней стратосферы (12-20 км) по результатам моделирования (сплошная линия) и измерений (пунктир)

На рис. 4 приведены межполушарные различия между моделируемой и наблюдаемой температурой стратосферы. В южном полушарии соответствие между расчетами и измерениями лучше, чем в северном полушарии, и это при том, что величина уменьшения температуры стратосферы в южном полушарии больше, чем в северном. Отличия влияющих на температуру факторов между полушариями может быть в изменении температуры поверхности океана и в активности планетарных волн.

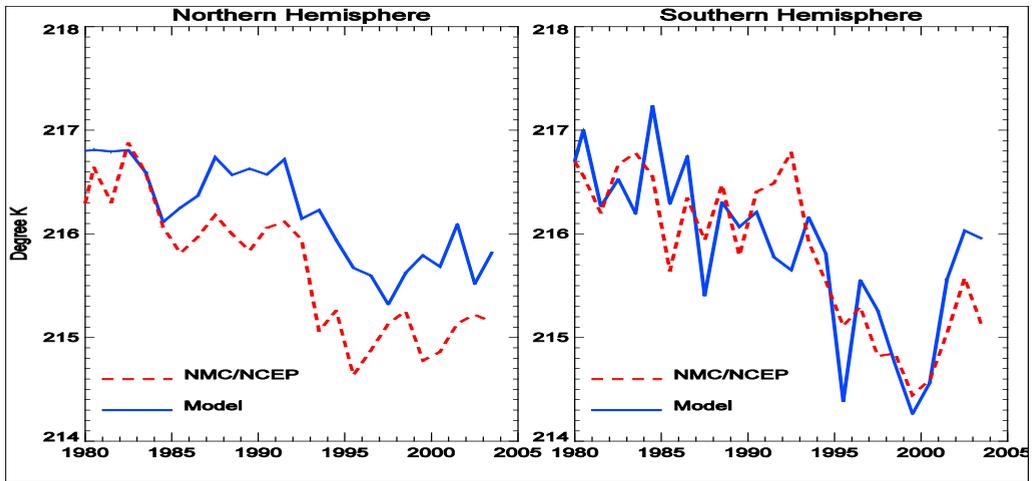


Рис. 4 – Изменение температуры нижней стратосферы (12-20 км) по результатам моделирования (сплошная линия) и измерений (пунктир) для северного и южного полушарий

На рис. 5 приведено используемое в используемой химико-климатической модели изменение средней температуры поверхности океана для северного и южного полушарий. Видно, что тенденция увеличения температуры поверхности океана в южном полушарии более явно выражено, что, по всей видимости, способствует формированию вертикальных и горизонтальных потоков тепла и массы, приводящих к охлаждению нижней стратосферы и подавляющих влияние изменения содержания озона. С другой стороны, известно, что планетарные волны более развиты в северном полушарии, что связано с более разнообразной орографией в этом полушарии, в результате чего может происходить изменение обмена воздухом между тропосферой и стратосферой и изменения температуры нижней стратосферы. По всей видимости, описание активности планетарных волн в используемой химико-климатической модели, также как и условия тропосферно-стратосферного обмена требуют дальнейших исследований и уточнений. В целом соответствие результатов расчетов газового состава и температуры хорошо совпадает с измерениями, что делает возможным использование данной модели для прогностических расчетов.

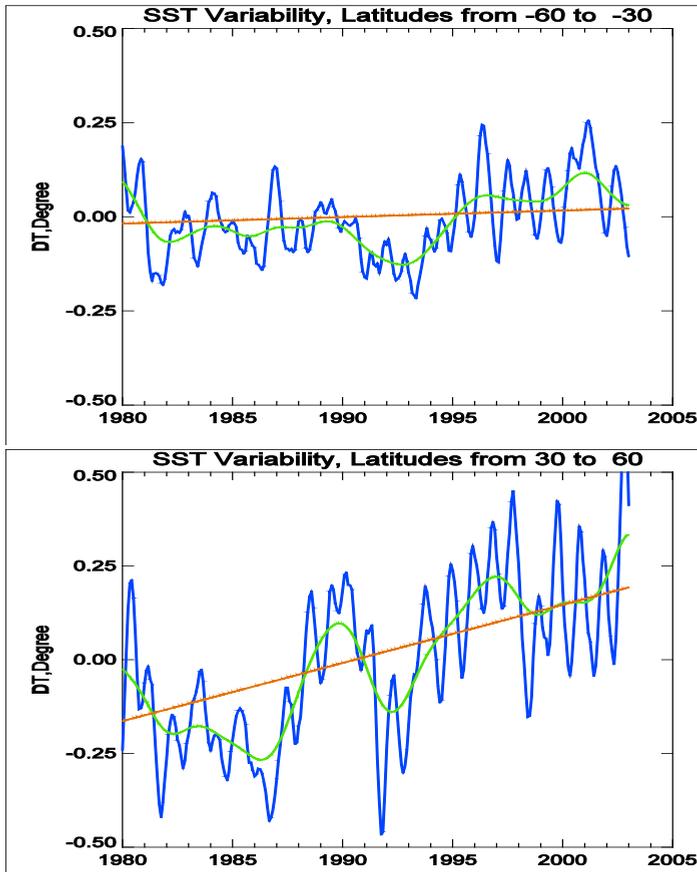


Рис. 5 – Изменение температуры поверхности океана в северном и южном полушариях

На рис. 6 приведено рассчитанное на модели изменение содержания озона для неполярных районов в предположении неизменной температуры нижней стратосферы. При этом процентное отношение по-прежнему берется к уровню 1979 года, чтобы контролировать скорость восстановления содержания озона до уровня, когда не наблюдалось существенных глобальных изменений содержания озона. В условиях холодной стратосферы 2000 года и при отсутствии влияния солнечной активности и аэрозоля содержание озона показывает быструю тенденцию к восстановлению, несмотря на то, что, в соответствии со сценариями ВМО, содержание хлорных и бромных составляющих за этот период сокращается не очень существенно. Таким образом, можно отметить, что изменение температуры стратосферы, влияющей на скорость протекания реакций разрушения озона, при оценке скорости восстановления глобального содержания озона до уровня 70-х годов может оказаться даже более существенным фактором, чем сокращение выбросов фреонов и галлонов.

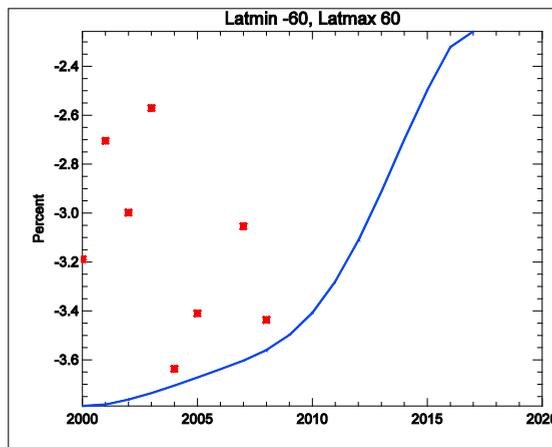


Рис. 6 — Будущие изменения содержания озона в неполярных районах без учета изменения температуры стратосферы

На рис. 7 показано будущее изменение содержания озона в базовом сценарии, когда учитываются изменения солнечной активности, аэрозоля и обратные связи между изменениями температуры и озона. Можно отметить, что, во-первых, соответствие результатов расчетов и измерений становится лучше для настоящего периода (2001-2008), во-вторых, тенденция к восстановлению содержания озона сохраняется, однако скорость увеличения содержания озона при учете обратных связей уменьшается, в-третьих, основное возрастание начинается после 2010 года, и, в-четвертых, что в будущем отмечаются короткопериодные колебания содержания озона, хотя солнечная активность, температура поверхности океана и площадь покрытия льдом, которые определяли короткопериодную изменчивость в прошлом, сохраняются на уровне 2007 года. Помимо внутренней изменчивости интерактивной системы, менялось также аэрозольное содержание атмосферы, рассчитываемое в зависимости от температуры стратосферы, которое могло оказать влияние на короткопериодную изменчивость содержания озона.

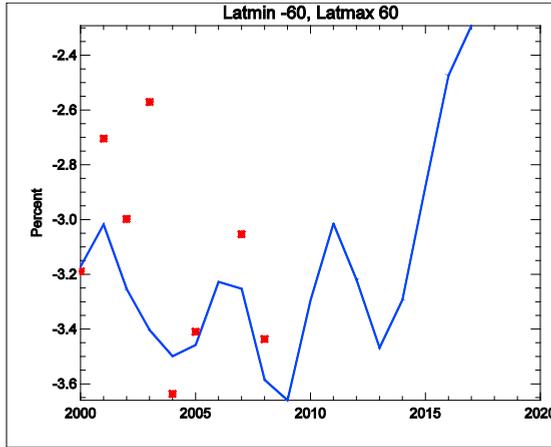


Рис. 7 – Будущие изменения содержания озона в неполярных районах в базовом сценарии

На рис. 8 приведено изменение содержания озона, рассчитанное в предположении фиксирования содержания аэрозоля на уровне 2005 года. Видно, что изменение содержания озона после 2010 года стало более плавным, что говорит о важной роли стратосферного сульфатного аэрозоля и гетерогенных процессов на его поверхности для исследования долгопериодных трендов содержания озона как в настоящем, так и в будущем.

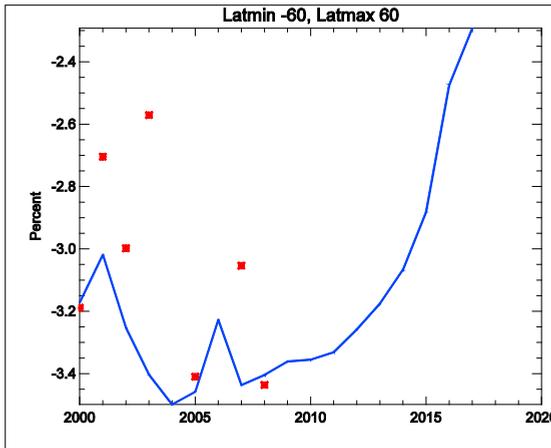


Рис. 8 – Будущие изменения содержания озона в неполярных районах в при фиксированном после 2005 года аэрозоле

Модельные расчеты изменения содержания озона при изменении содержания метана и углекислого газа не показали значимых отклонений от базового сценария. По всей видимости исследуемый интервал изменений этих газов (20 лет) является слишком коротким для того, что отметить их существенное влияние на газовый состав и температуру, хотя потенциал для такого воздействия существует. Планируемые

в дальнейшем исследования на более протяженный период времени (до 2050 года) должны помочь прояснить роль этих долгоживущих газов.

### **Заключение**

Выполнены модельные эксперименты с глобальной химико-климатической моделью с целью исследования одновременных и взаимосвязанных изменений содержания озона и температуры стратосферы в прошлом, настоящем и будущем.

Результаты проведенных экспериментов показали, что охлаждение стратосферы может оказаться решающим фактором, определяющим межгодовую изменчивость содержания озона. Изменение содержания озона в первой половине 90х годов может объясняться совпадением понижающего действия на озон содержания аэрозоля, солнечной активности и антропогенных выбросов фреонов и галлонов. Совокупное действие этих факторов и привело к резкому уменьшению глобального содержания озона в этот период. Во второй половине 90х годов содержание аэрозоля, а затем и солнечная активность начинают действовать в сторону повышения содержания озона, к чему добавляется охлаждение стратосферы, влияющее как на скорости химических реакций разрушения озона, так и на динамические процессы его переноса атмосферной циркуляцией. Этот фактор становится доминирующим в 2000х годах, что может способствовать более быстрому восстановлению содержания озона при сокращении выбросов фреонов и галлонов.

Сравнение результатов моделирования межгодовой изменчивости температуры стратосферы показало, что изменение содержания озона не является определяющим фактором этой изменчивости. Хотя изменение содержания озона может привести к изменению нагрева стратосферы, другие факторы, такие, как вариации температуры поверхности океана и активности планетарных волн, отличающиеся в разных полушариях Земли, могут оказать более существенное влияние на изменение температуры стратосферы и далее концентрации малых газов атмосферы.

Эксперименты по исследованию будущих изменений содержания озона показали, что в условиях холодной стратосферы, когда замедляются химические реакции разрушения озона, восстановление глобального содержания к уровню 70х годов XX столетия может происходить быстрее, чем будет сокращаться содержание в атмосфере хлорных и бромных газовых примесей. В условиях обратного воздействия изменения газов на температуру стратосферы это восстановление может замедлиться, если при увеличении содержания озона стратосфера начнет нагреваться. Однако изменение других факторов и, прежде всего, содержания аэрозоля, солнечной активности и температуры поверхности океана может повлиять на изменения как температуры, так и газового состава и, следовательно, на скорость восстановления озона.

Модельные расчеты изменения содержания озона при изменении содержания метана и углекислого газа не показали значимых отклонений от базового сценария. По всей видимости, исследуемый интервал изменений этих газов (20 лет) является слишком коротким для того, что отметить их существенное влияние на газовый состав и температуру, хотя потенциал для такого воздействия существует.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 2595 от 26 ноября 2009 г.) по направлению «Физика атмосферы».

## Литература

1. WMO, Global Ozone Research and Monitoring // Scientific Assessment of Ozone Depletion Project. Report No. 44. – Geneva, 1999.
2. The Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer. – Vienna, 1985.
3. Монреальский протокол по проблеме веществ, разрушающих озонный слой : бюллетень ВМО. – Монреаль: 1988. – Т. 37, №2.
4. *Smyshlyaev S. P., Dvortsov V., Geller M.A., Yudin V.* A two-dimensional model with input parameters from a general circulation model: Ozone sensitivity to different formulations for the longitudinal temperature variation // *J. Geophys. Res.* – 1998. Vol. 103. – P. 28373–28387.
5. *Yudin V., Smyshlyaev S.P., Geller M.A., Dvortsov V.* Transport diagnostics of GCMs and implications for 2-D chemistry transport model of troposphere and stratosphere // *J. Atmospheric Sci.* – 2000. Vol. 57. – P. 673–699.
6. *Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лысков В.Н.* Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. – М.: Препринт ИВМ РАН № 2086-В98, 1998. – 180 с.
7. *Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я.* Чувствительность климатической системы к малым внешним возмущениям // *Метеорология и гидрология.* – 2004. – № 4. – С. 77-92.
8. *Seinfeld, J.H.* Atmospheric Chemistry and Physics / *J.H. Seinfeld, S.N. Pandis* // Wiley Interscience. – 1998. – P. 22–26.
9. Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Atmospheric Studies // NASA Panel for Data Evaluation. – 2003. №14.
10. *Stockwell W. R.* A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling / *W. R. Stockwell, F. Kirchner, M. Kuhn* // *J. Geophys. Res.* – 1997. Vol. 102. – P. 20–21.
11. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2004. Т. 40, №2. – С. 211–222.
12. *Галин В.Я., Володин Е.М., Смышляев С.П.* Модель общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН с динамикой озона // *Метеорология и гидрология.* – 2003. – № 5. – С. 13–24.
13. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // *Изв. РАН.* – 2007. – Т. 43, №4. – С.437–452.
14. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Г. Шаарийбуу, Моцаков М.А.* Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2010. – Т. 46, №3. – С. 265–280.

*Т.В. Суходолов, П.А. Блаkitная, О.П. Боровская, С.П. Смышляев*

**МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ  
СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА И ТЕМПЕРАТУРЫ СТРАТОСФЕРЫ**

*T.V. Sukhodolov, P.A. Blakitnaya, O.P. Borovskaya, S.P. Smyshlyaev*

**A MODEL STUDY OF THE SIMULTANEOUS STRATOSPHERIC OZONE AND  
TEMPERATURE VARIABILITY**

*Трехмерная интерактивная химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы используется для исследования влияния взаимосвязи химических и физических процессов на межгодовую изменчивость температуры и содержания озона в стратосфере. Результаты численных экспериментов с отдельным и совместным влиянием разных факторов на химический состав и циркуляцию атмосферы показали, что обратные связи могут оказать как количественное, так и качественное воздействие на содержание озона и температуру.*

*Ключевые слова: озон, температура, стратосфера, влияющие факторы, обратные связи.*

*A three-dimensional interactive chemistry climate model of the lower and middle atmosphere is used to study impacts of interactions between chemical and physical processes in the atmosphere on interannual temperature and atmospheric ozone variability in the stratosphere. The model results have shown that feedbacks between ozone and temperature changes can have both quantitative and qualitative impact on the temperature and atmospheric ozone variability.*

*Key words: ozone, temperature, stratosphere, impact factors, feedbacks*

Наблюдаемые в последнее время изменения климата [1] и газового состава атмосферы [2] происходят одновременно и могут быть взаимосвязаны. Увеличение или уменьшение температуры воздуха может привести к вариациям скоростей химических реакций с результирующим изменением содержания атмосферных газов. С другой стороны, изменение концентраций радиационно-активных газов в атмосфере, таких как озон, метан, фреоны или водяной пар, оказывает заметное влияние на радиационный нагрев и выхолаживание в атмосфере с соответствующими вариациями ее циркуляции и температурного режима [3].

Атмосферный озон, концентрация которого в воздухе на различных высотах измеряется лишь миллионными и даже миллиардными долями, является, тем не менее, одним из важнейших атмосферных газов в силу своих оптических и химических свойств. Поглощение озоном биологически активного компонента ультрафиолетовой солнечной радиации служит основным механизмом, регулирующим интенсивность этой радиации у поверхности Земли и, таким образом, наличие озонового щита является жизненно важным для существования разнообразных форм жизни на Земле. Поглощение озоном коротковолновой солнечной радиации и излучение в инфра-

красной области спектра (в окрестности 9,6 мкм) служат важнейшими составляющими радиационного и термического баланса атмосферы [4].

Наличие стратосферного озонного слоя радикальным образом влияет на температурную стратификацию стратосферы и, тем самым, оказывает важное воздействие на динамические процессы и климат стратосферы. Однако если раньше можно было говорить о явной зависимости между изменением содержания озона и изменением температуры стратосферы, то результаты наблюдений последних десятилетий заставляют пересмотреть причинно-следственные связи между стратосферными процессами и вклад каждого из них в общую картину наблюдаемых аномальных изменений.

Механизмы, ответственные за эти изменения, должны изучаться с помощью численного моделирования. Для теоретического исследования изменчивости циркуляции и температурного режима атмосферы используются численные математические модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) [5-7]. При этом при применении МОЦА для изучения проблемы глобального потепления задаются фиксированные поля концентрации озона и других радиационно-активных газов, необходимые для расчета нагрева атмосферы, который управляет атмосферной циркуляцией. С другой стороны, при использовании моделей газового состава (МГС) для изучения проблемы изменения содержания атмосферных газов для вычисления пространственно-временного распределения всех влияющих на озон газовых составляющих часто используются поля ветра и температуры из моделей общей циркуляции атмосферы. При этом обратное влияние рассчитываемых полей содержания озона на динамику, как правило, не учитывается [8, 9].

Взаимосвязь моделей общей циркуляции атмосферы и газового состава до недавнего времени не рассматривалась, хотя и является важной. Оптимальным для исследования изменений климата является химико-климатическое моделирование, которое позволяет учесть взаимодействия атмосферных физических и химических процессов [10]. Несмотря на то, что модельному исследованию этих процессов в последнее время уделялось значительное внимание, при этом связь между изменением газового состава и тепловым режимом средней атмосферы до конца не ясна.

Главной целью настоящей работы является исследование взаимосвязи между наблюдаемыми изменениями содержания озона и температуры стратосферы и процессами, влияющими на эти изменения с помощью трехмерной химико-климатической модели.

### **Методология**

Для достижения цели настоящего исследования сначала были выделены основные физические и химические процессы, определяющие долгопериодную изменчивость содержания атмосферных газов и температуры. К фундаментальным процессам, ответственным за состояние и эволюцию структуры и состава атмосферы, относятся химические реакции, процессы переноса излучения и тепла, а также динамика атмосферы. Эти процессы не являются независимыми и при любом возмущении (например, при изменении солнечного потока, извержении вулканов и др.) проявляются обратные связи. Возникает взаимодействие различных процессов [3].

Для выявления причин наблюдаемой межгодовой изменчивости содержания озона и других атмосферных газов и температуры необходимо исследовать влияние следующих факторов: выбросы химически активных газов с поверхности земли, из-

менение содержания углекислого газа, изменение температуры поверхности океана, одиннадцатилетний цикл солнечной активности [11], изменение содержания в атмосфере аэрозолей в результате вулканической активности [12]. Предполагается, что на аномальное поведение температуры стратосферы последних десятилетий могло существенно повлиять изменение температуры поверхности океана и увеличение концентрации углекислого газа.

Для проведения подобных модельных экспериментов необходимо использовать интерактивную химико-климатическую модель, способную адекватно описывать фундаментальные процессы, ответственные за состояние и эволюцию структуры и газового состава атмосферы, с учетом взаимного влияния изменений температуры и содержания озона друг на друга. В работе используется совместная глобальная трехмерная химико-климатическая модель, разработанная в Институте вычислительной математики Российской академии наук (ИВМ РАН) и Российском Государственном Гидрометеорологическом Университете (РГГМУ). Особенность используемой модели состоит в интерактивном обмене расчетных данных МОЦА и МГС, что позволяет учитывать взаимодействия фотохимических и динамических процессов в атмосфере на каждом модельном шаге по времени (обратные связи между содержанием радиационно-активных малых газов и атмосферным переносом).

Разрешение в атмосферном блоке составляет  $5^\circ$  по долготе,  $4^\circ$  по широте и 39 у-уровней по вертикали от поверхности земли до высоты 90 км. В модель общей циркуляции атмосферы включены все основные физические процессы, связанные с переносом влаги и с изменениями температуры в атмосфере, в пограничном слое и в почве, с воздействием гравитационных волн, с орографическими эффектами, влиянием облаков и радиации. Уравнения гидротермодинамики решаются на сетке «С» по классификации Аракавы конечно-разностным методом. В радиационном блоке в коротковолновой части спектра рассматривается 18 спектральных интервалов, а в длинноволновой части – 10 спектральных интервалов. Прогностическими переменными являются вертикальные и горизонтальные компоненты скорости ветра, температура, влажность и приземное давление, которые используются в качестве входных параметров для модели газового состава атмосферы.

Фотохимическая модель рассматривает пространственно-временную изменчивость 74 основных малых газов, участвующих в 123 газофазных и 23 гетерогенных химических реакциях и 51 процессах фотодиссоциации. Фотохимическая схема химических реакций включает все основные реакции кислородного, водородного, азотного, хлорного, бромного и серного циклов, что позволяет рассматривать влияние как химических процессов на образование и эволюцию озона, так и атмосферного сульфатного аэрозоля. Количество и тип учитываемых фотохимических реакций позволяют исследовать изменчивость основных влияющих на озон газов как в стратосфере, так и в тропосфере [13].

С химико-климатической моделью были проведены численные эксперименты по воспроизведению эволюции структуры и газового состава атмосферы в 1979–2003 гг. Нижние граничные условия в модели задаются на основании данных ВМО (потoki газовых примесей с земной поверхности) [2]. Температура поверхности океана и площадь покрытия льдом – по данным эксперимента AMIP2 (Atmospheric

Model Intercomparison Project). Результаты сравнения модельных расчетов динамики изменения температуры, озона и других малых газов с измерениями и другими моделями показали, что модель достаточно точно воспроизводит как внутригодовые пространственно-временные распределения исследуемых характеристик, так и их межгодовую изменчивость.

### Результаты модельных расчетов

Для исследования влияния изменчивости параметров выделенных процессов на газовый состав и температуру стратосферы с химико-климатической моделью было проведено несколько численных экспериментов по воспроизведению эволюции структуры и газового состава атмосферы в 1979–2003 гг. Наиболее интересным, в рассматриваемый период, является промежуток с середины 90-х годов и до настоящего времени. После уменьшения, связанного с извержением Пинатубо и минимумом солнечной активности, и реакции на это уменьшение температуры, содержание озона постепенно восстанавливается, а температура остается примерно на том же уровне. Предполагается, что наиболее существенную роль в это время может играть увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  и изменение температуры поверхности океана.

При исследовании использовалась методика, согласно которой параметры каждого процесса кроме исследуемого в данном численном эксперименте принимались фиксированными на уровне 1979 года. Описание сценариев модельных экспериментов приведено в таблице 1.

Нижние граничные условия (потоки газовых примесей с земной поверхности) и содержание атмосферных аэрозолей в модели задаются на основании данных ВМО.

Таблица 1

Описание численных экспериментов

Предмет исследования	Учет нижних граничных условий	Результат моделирования
Влияние всех процессов одновременно	+	Рис. 1, 2
Влияние потоков с поверхности Земли	+	Рис 5, 6
Влияние аэрозолей	+	Рис 7, 8
Влияние температуры поверхности океана (ТПО), без учета всех факторов	-	Рис 9, 10
Влияние всех факторов без учета ТПО	+	Рис. 11, 12
Влияние двуокиси углерода	-	Рис. 13, 14

Температура поверхности океана и площадь покрытия льдом - по данным эксперимента AMIP.

Основной целью численных экспериментов с химико-климатической моделью являлось исследование влияния параметров выбранных процессов на газовый состав и температурный режим атмосферы. Однако перед проведением подобных расчетов необходимо убедиться, что используемый комплекс моделей газового состава и общей циркуляции атмосферы корректно воспроизводит основные наблюдаемые

особенности пространственно-временного распределения содержания атмосферных газов, температуры и скоростей атмосферного переноса. Для решения этой задачи был выполнен эволюционный модельный эксперимент, в котором исследовалась изменчивость состава и структуры атмосферы с 1979 по 2003 годы.

Результаты экспериментов по тестированию модельного комплекса ХКМ приведены на рис. 1 и 2. Анализ этих результатов показывает, что модель достаточно точно воспроизводит межгодовую изменчивость пространственно-временных распределений исследуемых характеристик. Однако имеет место небольшое занижение содержания озона после извержения Пинатубо в 1991 году и несколько сглаженный профиль температуры, что необходимо будет учитывать в следующих экспериментах. Так же температура слишком соответствует изменению озона. В отличие от измерений, где после спада начала 90х концентрация озона восстанавливается, а температура колеблется примерно на том же уровне, модельная температура начинает расти вслед за озоном, что, возможно, может быть обусловлено как раз занижением и резким переходом от уменьшения к увеличению модельного содержания озона. Но, тем не менее, можно сделать заключение о том, что блоки химии и динамики, а также их взаимодействие в ХКМ описаны довольно корректно, что позволяет использовать модель для дальнейшего исследования основных факторов наблюдаемой изменчивости атмосферного озона и температуры.

Был проведен эксперимент без учета всех факторов для выявления собственной изменчивости атмосферы. Как и предполагалось, и содержание озона и температура остаются примерно на том же уровне с некоторыми колебаниями, обусловленными, скорее всего, волновой активностью атмосферы (рис 5, 3).

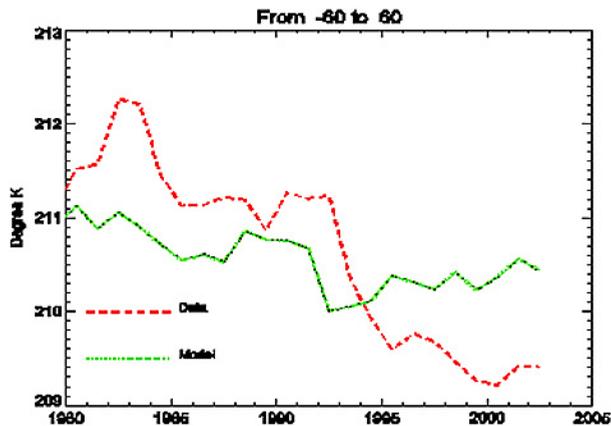


Рис. 1 – Изменчивость температуры стратосферы с учетом всех влияющих факторов

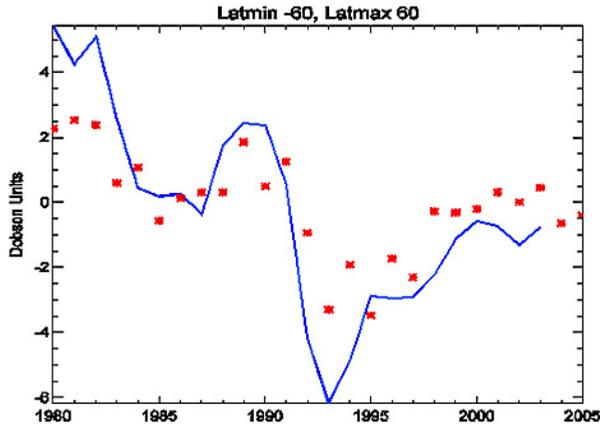


Рис. 2 – Изменчивость содержания озона с учетом всех влияющих факторов

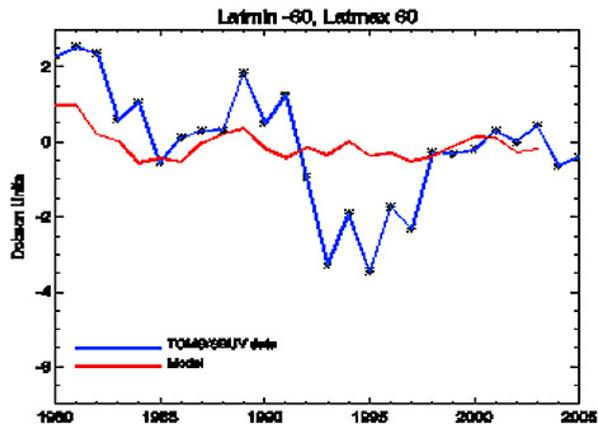


Рис. 3 – Собственная изменчивость содержания озона

Разрушение озона в атмосфере происходит, главным образом, в каталитических циклах с участием азотных, водородных, хлорных и бромных радикалов. Подписание Монреальского протокола в 1988 году позволило существенно сократить выбросы озоноразрушающих веществ. Так на рис. 4 видно, что с начала 90-х годов интенсивность их роста сократилась, перейдя затем в устойчивое состояние с дальнейшим уменьшением.

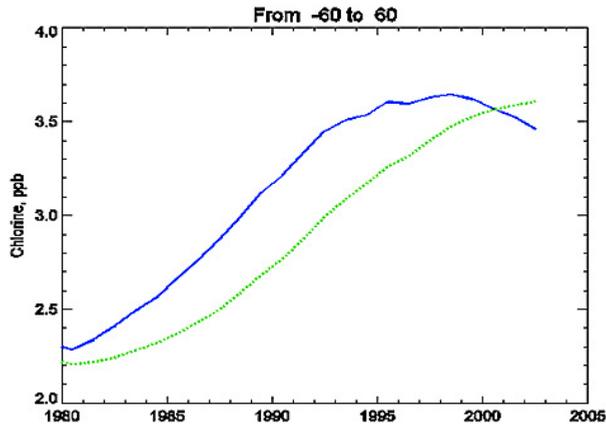


Рис. 4 – Изменчивость выбросов с поверхности Земли хлора и бромапо данным ВМО

Был проведен эксперимент, в котором учитывалось только изменение нижних граничных условий с потоками газовых примесей, для оценки их влияния на содержание озона (рис. 5) и температуру стратосферы (рис. 6). Результаты показали, что газовые примеси активно разрушают озон, формируя основной тренд его изменчивости. Температура стратосферы понижается из-за уменьшения нагрева за счет поглощения озоном ультрафиолета. Но в то же время понижение температуры несколько компенсирует разрушение озона, влияя на скорости химических реакций. Содержание озона плавно уменьшается до середины 90-х годов, а затем начинает понемногу расти, что обусловлено сокращением выбросов и уменьшением скоростей химических реакций из-за понижения температуры стратосферы.

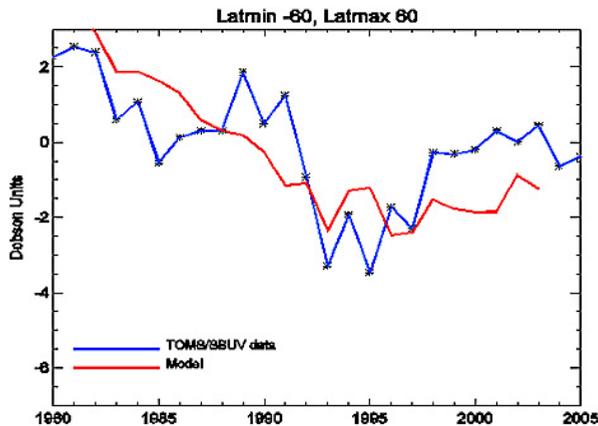


Рис. 5 – Изменчивость содержания озона за счет потоков газовых примесей

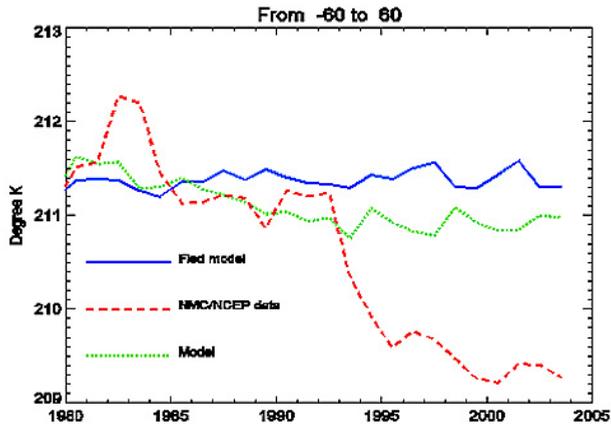


Рис. 6 – Изменчивость температуры стратосферы за счет потоков газов

На рис. 7 и 8 представлены результаты экспериментов по изучению влияния атмосферных аэрозолей на содержание озона и температуру стратосферы. В модельных расчетах учтены потоки газовых примесей и выбросы продуктов извержений вулканов Эль—Чичон (1982 г., Мексика) и Пинатубо (1991 г., Филиппины), которые были самыми мощными в течение рассматриваемого периода времени.

Увеличение количества аэрозолей после крупных извержений приводит как к ослаблению проникающего солнечного излучения за счет рассеяния, так и к увеличению поглощения солнечной радиации и излучения Земли. В результате последнего эффекта наблюдается уменьшение прямого солнечного излучения и увеличение рассеянного. Суммарный эффект всех этих процессов приводит к нагреву атмосферы на высотах стратосферы, что хорошо заметно на рисунках, когда даже на фоне понижения содержания озона из-за его разрушения продуктами извержения, температура стратосферы некоторое время растет, тем самым усиливая разрушение озона.

В целом модель неплохо воспроизводит влияние выбросов аэрозолей, обозначая резкие переходы от минимума к максимуму. Вулканическая активность несомненно является очень важным фактором, но носит больше эпизодический характер, не оказывая особого влияния на общий тренд. К тому же существенное влияние наблюдается лишь в первую половину рассматриваемого нами срока, и в оценке дальнейших, интересующих нас изменений, аэрозоли, как видно, большой роли не играют.

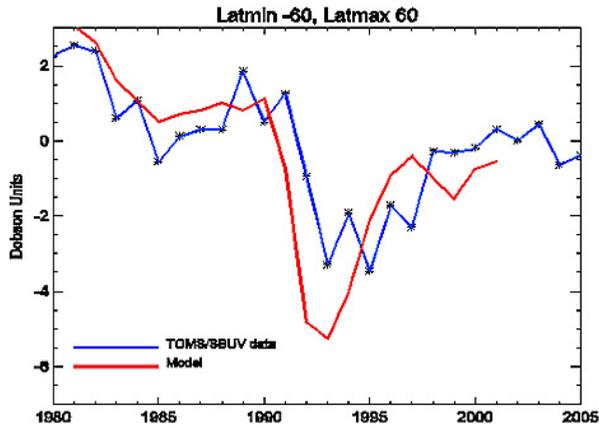


Рис. 7 – Изменение содержания озона при изменении содержания аэрозоля

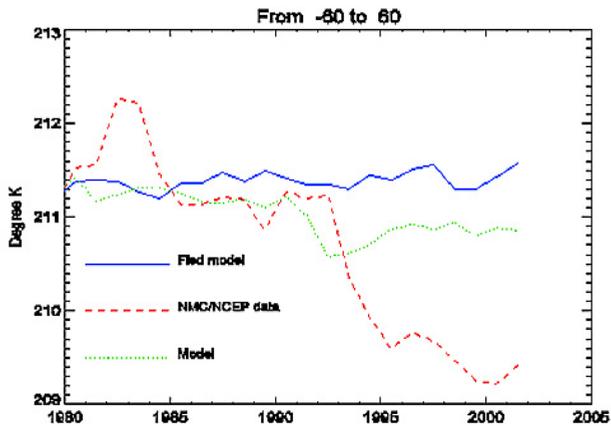


Рис. 8 – Изменчивость температуры стратосферы с учетом извержений вулканов

С химико–климатической моделью были проведены эксперименты по исследованию влияния изменчивости потоков солнечной радиации, обусловленных солнечной активностью, на содержание озона и температуру стратосферы (рис. 9 и 10). На данном этапе также учитывались нижние граничные условия с потоками газовых примесей.

Выполненные расчеты показали, что изменение содержания озона хорошо соответствует фазам солнечной активности, т.е. отмечается повышение содержания озона при увеличении уровня солнечной активности. Этот положительный отклик озоносферы хорошо заметен в периоды, близкие к 80–му, 90–му и 2000 годам. В результате отмечаются максимальные значения содержания озона за рассматриваемый период, что подчеркивает важность учета цикла солнечной активности.

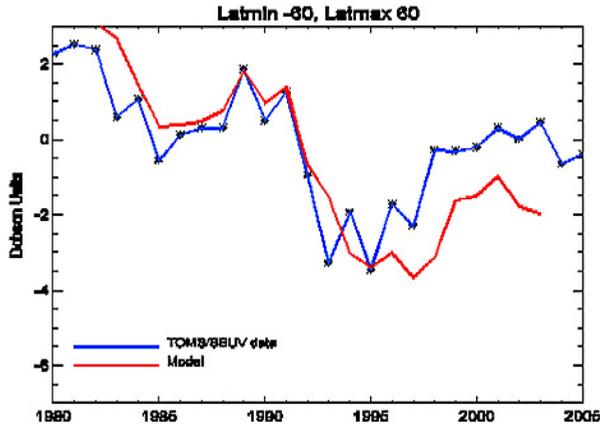


Рис. 9 – Изменчивость содержания озона с учетом потоков солнечной радиации

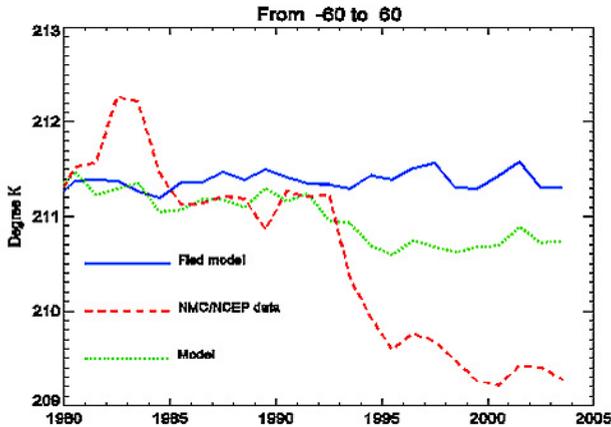


Рис. 10 – Изменчивость температуры стратосферы с учетом потоков солнечной радиации

Предполагалось, что температура поверхности океана может оказаться одним из факторов, существенно повлиявших на интересующий нас период с середины 90-х и до настоящего времени. Для проверки этой гипотезы были проведены эксперименты с учетом ТПО и исключением всех остальных факторов (рис. 11 и 12) и с учетом всех факторов за исключением ТПО (рис. 13 и 14).

Анализ модельных экспериментов показывает, что ТПО слабо влияет как на температуру стратосферы, так и на содержание озона. У температуры стратосферы появляется слабая тенденция к росту за счет роста ТПО, но на фоне остальных факторов этот вклад не является существенным. Сравнение рис. 12 и 1 позволяет сделать вывод, что океан является источником температурных флуктуаций, которые присутствуют на рис 1, а на рис 12 их нет.

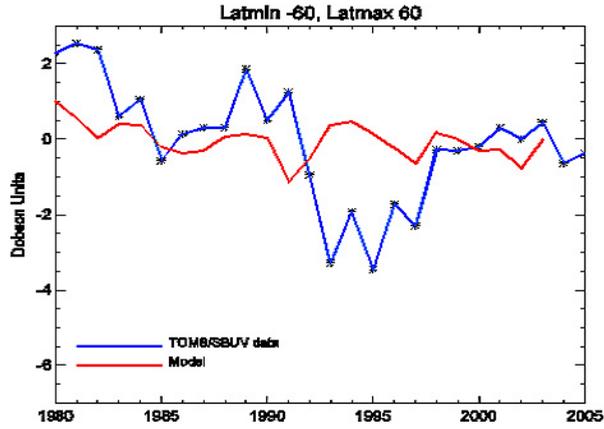


Рис. 11 – Изменчивость содержания озона за счет ТПО.

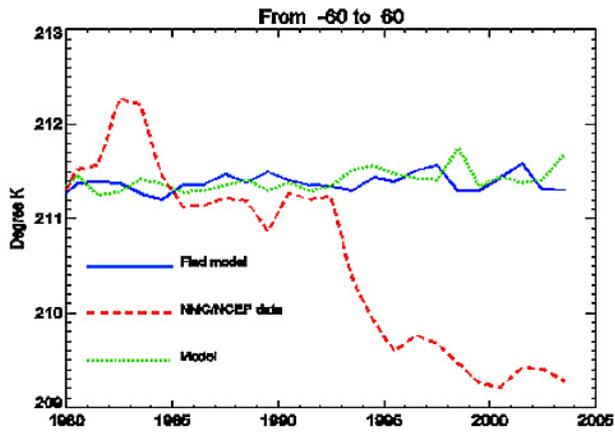


Рис. 12 – Изменчивость температуры стратосферы за счет ТПО

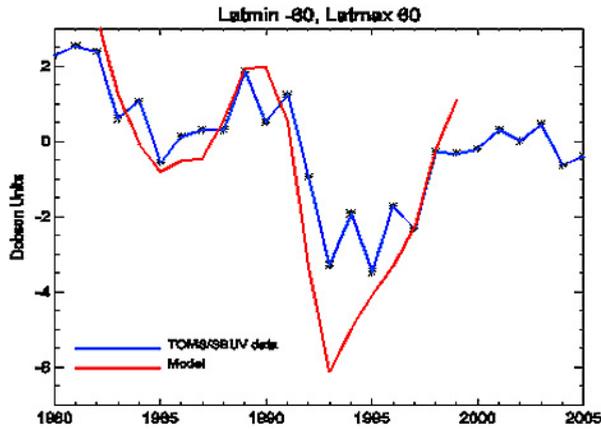


Рис. 13 – Изменение содержания озона с учетом всех факторов за исключением ТПО

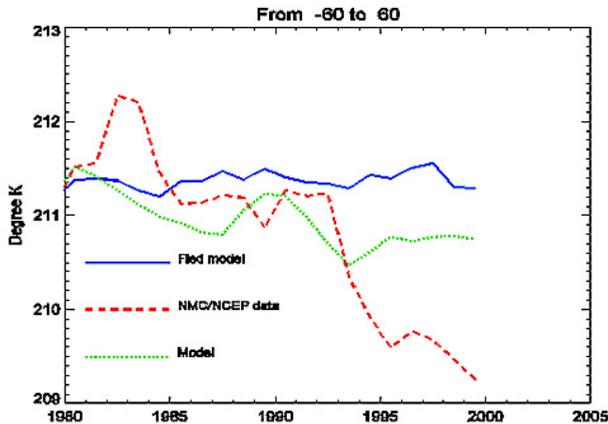


Рис. 14 – Изменчивость температуры стратосферы с учетом всех факторов за исключением ТПО

В последнем эксперименте исследовалось влияние двуокиси углерода на изменения температуры стратосферы и содержания озона. Предполагалось, что увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  на фоне понижения концентраций фреонов может оказать решающую роль в формировании охлаждения стратосферы, наблюдавшегося с середины 90-х годов.

Однако результаты, приведенные на рис 15 и 16, показывают, что влияние углекислого газа незначительно. Какое-то влияние на температуру, конечно, есть, но результат этого влияния слабо отличается от собственных флуктуаций атмосферы. Не смотря на то, что концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере неуклонно увеличивается, видимо на данный она все же не способна пока оказать заметного влияния. С другой стороны, в модели могут быть не точно или с ошибкой описаны механизмы взаимодействия с  $\text{CO}_2$ , либо несовершенны научные представления о том, как нужно их описывать.

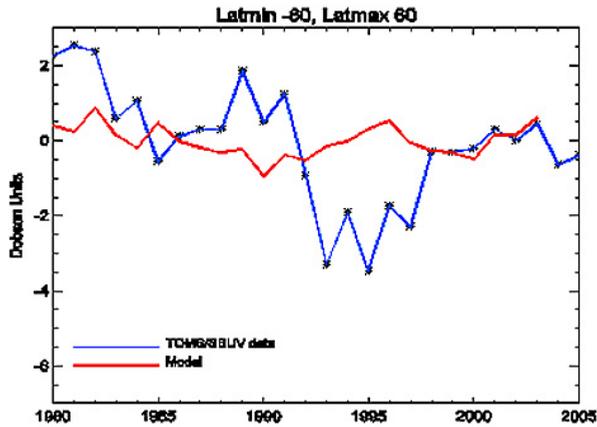


Рис. 15 – Изменчивость содержания озона за счет двуокиси углерода

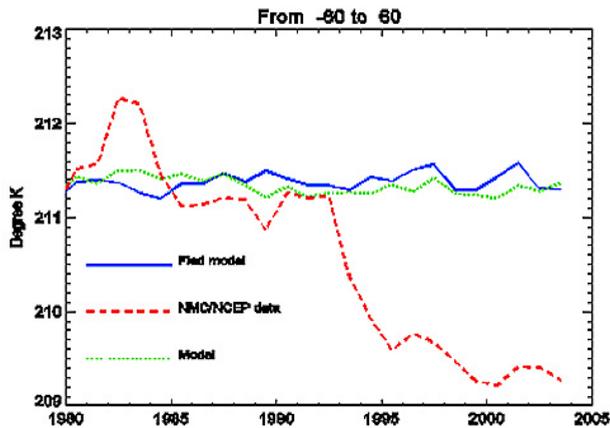


Рис. 16 – Изменчивость температуры стратосферы за счет двуокиси углерода.

### **Заключение**

Представлены результаты модельных экспериментов с трехмерной интерактивной химико-климатической моделью нижней и средней атмосферы, выполненных с целью исследования влияния обратных связей между химическими, радиационными и динамическими процессами на межгодовую изменчивость содержания озона и температуры стратосферы. Сопоставление результатов численных экспериментов с раздельным и совместным моделированием влияния изменения солнечной активности на фотохимию, радиацию и циркуляцию атмосферы показало, что обратные связи могут приводить как к количественным, так и качественным изменениям содержания озона и температуры.

Полученные результаты показали важность учета обратных связей между изменением содержания атмосферных газов, температуры и циркуляции атмосферы. При этом следует заметить, что полученные в настоящей работе выводы требуют дальнейшего углубленного исследования и экспериментальной проверки путем сравнения результатов измерений содержания озона и температуры в годы с различным уровнем солнечной активности, а также расчеты с использованием реальной изменчивости уровня солнечной активности от года к году. Подобная работа планируется авторами для выполнения в ближайшем будущем.

Эксперимент с учетом влияния всех факторов показал, что, несмотря на хорошее соответствие результатам измерений, аномального поведения температуры после середины 90-х годов нет. Температура по-прежнему четко идет вслед за озоном. В целом можно сделать вывод, что модель хорошо описывает все процессы и их взаимосвязь между собой, но, тем не менее, либо какие то обратные связи не учтены или недооценены, либо существуют факторы, влияние которых так же недооценено в модели по причине недостаточного их изучения, и проблема нуждается в дальнейшей разработке.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П2595 от 26 ноября 2009 г.) по направлению «Физика атмосферы».

### Литература

1. *Houghton J.T.* The Scientific Basis: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Intergovernmental Panel on Climate Change. – 2001. – P. 881.
2. WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion // Global Ozone Research and Monitoring Project. Report № 47. – Geneva, 2003.
3. *Брасье Г., Соломон С.* Аэрономия средней атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 291 с.
4. *Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хризан А.Х.* Озонный щит Земли и его изменения. – СПб: Гидрометеиздат, 1992. – 288 с.
5. *Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лысков В.Н.* Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. – М.: Препринт ИВМ РАН № 2086-В98, 1998. – 180 с.
6. *Володин Е.М., Дианский Н.А.* Воспроизведение изменений климата в 19-22 столетиях с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана. – 2006. – №3. – С. 291–306.
7. *Галин В.Я., Володин Е.М., Смышляев С.П.* Модель общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН с динамикой озона // Метеорология и гидрология. – 2003. – №5. – С.13–23.
8. *Geller M.A., Smyshlyaev S.P.* A Model Study of Total Ozone Evolution 1979-2000 – The Role of Individual Natural and Anthropogenic Effects // Geophys. Res. Letters. – 2002. Vol. 29, №22. – P. 2048.
9. *Jackman C.H.* Past, present, and future modeled ozone trends with comparisons to observed trends // J. Geophys. Res. – 1996. Vol. 101. – P. 28753–28767.
10. *Eyring V.* A strategy for process-oriented validation of coupled chemistry-climate models // Bull. Am. Meteorol. Soc. – 2005. Vol. 86. – P. 1117–1133.
11. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Г. Шаарийбуу, Моцаков М.А.* Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2010. Т.46. №3. С. 3–15.
12. *Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я.* Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. –Т. 46. – №4. –С. 5–17.
13. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв.РАН, сер.ФАО. – 2007. – Т. 43. – № 4. – С.347–452.

*А.П. Филиппенко, П.А. Блаkitная, А.Р. Курганский, С.П. Смышляев, Т.В. Суходолов*

**АНАЛИЗ СОСТАВА ВЫБРОСОВ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ  
В РЕГИОНЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ИХ  
ТРАНСГРАНИЧНОГО ПЕРЕНОСА**

*A.P. Filippenko, P.A. Blakitnaya, A.R. Kurgansky, S.P. Smyshlyayev, T.V. Sukhodolov*

**CHEMICAL SPECIES EMISSIONS AT THE ST.PETERSBURG REGION AND  
THEIR TRANS BOUNDARY TRANSPORT TO THE REMOTE AREAS**

*Анализируется состав выбросов в атмосферу химически активных малых газовых составляющих в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Рассматривается их трансформация в местах выбросов и потенциал для трансграничного переноса. Для оценки химического потенциала используется боксовая фотохимическая модель, а для оценки способности к трансграничному переносу – траекторная модель.*

*Ключевые слова: газовые выбросы, местная химическая трансформация, атмосферный перенос газов, обратные траектории.*

*Chemical emissions inventory for St.Petersburg and Leningradskaya region is analyzed based on the sources of gases. Local chemical transformation is compared to the ability to trans boundary transport. Box photochemical model is used to estimate local transformation, while back trajectory model is applied to trans boundary estimations.*

*Key words: gas emissions, local chemical transformation, atmospheric transport of gases, back trajectory.*

Наступление 21 века сопровождалось быстрым экономическим развитием Российской Федерации и соседних государств, миграцией населения в крупнейшие мегаполисы страны, развитием инфраструктуры, многоэтажного городского строительства, увеличением потоков автотранспорта и, как следствие, увеличением интенсивности антропогенных газовых выбросов с поверхности урбанизированных территорий. В настоящее время процессы расширения транспортных магистралей, плотного городского строительства продолжают, в результате чего образуются устойчивые зоны с повышенными концентрациями загрязнений в регионах России.

По результатам современных исследований в области химического прогноза погоды, антропогенные выбросы с поверхности урбанизированных территорий могут влиять не только на качество воздуха в регионе и, следовательно, здоровье населения, но и на локальные погодные условия, выработку новых и режим естественных природных выбросов с поверхности. Данные процессы могут привести к изменению пространственного и временного распространения примесей в атмосфере данного региона, что, несомненно, скажется на климатических характеристиках глобальной системы Земли.

Объектом исследования настоящей работы является фотохимическая трансформация газовых загрязнителей в регионе Санкт-Петербурга. Данная работа направ-

лена на изучение состава выбросов химически активных газов в атмосферу Санкт-Петербурга, а их перенос в атмосфере.

На сегодняшний день существует довольно большое количество региональных и глобальных атмосферных моделей с функцией химического прогноза погоды.

Для решения задач настоящей работы была одномерная боксовая химическая модель атмосферы РГГМУ для определения потенциала переноса примесей в атмосфере мегаполисов.

Боксовая модель была модифицирована и адаптирована под условия проведения экспериментов в мегаполисе Санкт-Петербург. Адаптация модели заключалась во включении нового химического механизма параметризации фотохимических процессов в ПСА мегаполисов с учетом их особенностей с перспективой использования в оперативных моделях численного прогноза погоды и качества воздуха. Модель была модифицирована путем стыковки нового фотохимического механизма ориентированного на тропосферу урбанизированных территорий.

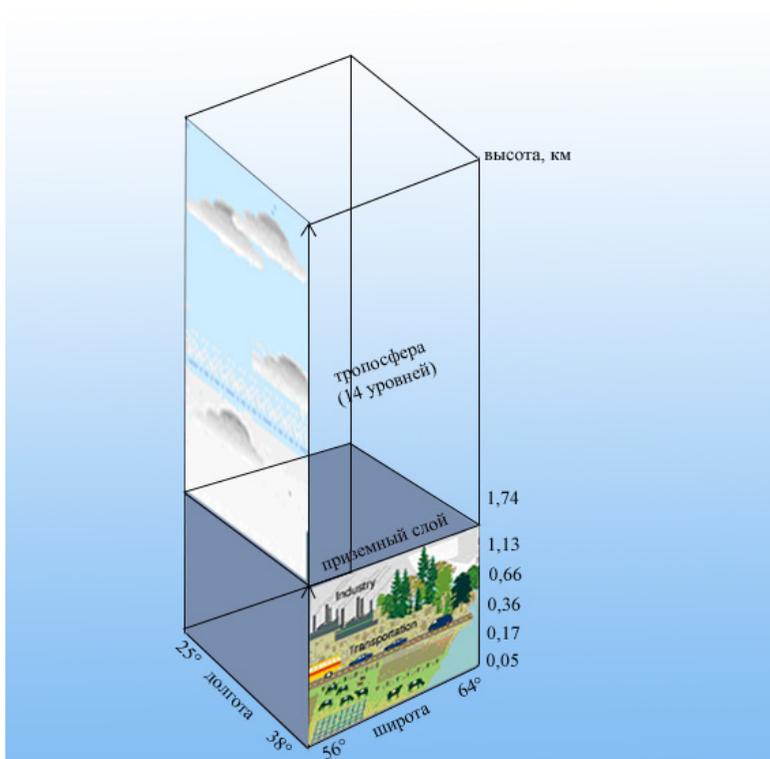


Рис. 1 – Схематический вид боксовой модели атмосферы

Основные уровни стыковки фотохимического механизма заключаются в формировании механизма реакций, расчет скоростей прохождения химических реакций их дифференциальное «решение», и зависимость от температуры и давления [1].

Граничные условия для химических веществ указаны как потоки с поверхности мегаполисов в атмосферу. Начальные условия задавались на основе данных трехмерной химико-климатической модели ИВЦ РАН РГГМУ и измерений экспериментов TROICA [2], проведенных в мегаполисах. Граничные и начальные условия задавались для круга широты.

Выбросы от площадных источников рассматривались как антропогенные и биогенные совместно. Предполагается, что такие выбросы происходят у поверхности земли и поступают в нижний модельный уровень. Эмиссии от мощных основных источников выбросов могут быть рассчитаны сразу на нижнем модельном уровне, без расчета дисперсии у земли. Биогенные выбросы рассчитаны в реальном времени на каждом шаге по времени в химическом модуле с использованием скоростей потоков выбросов.

Коэффициенты фотодиссоциации первоначально зависят от высоты, зенитного угла солнца, содержания озона в столбе атмосферного воздуха или на модельном уровне, альbedo подстилающей поверхности, температуры. Коэффициенты рассчитываются при условии ясного безоблачного неба на каждом модельном уровне и временном шаге, а затем проводится подправка с учетом присутствия облачности. Потоки солнечной радиации берутся из расчетов Всемирной метеорологической организации (ВМО) 1986 года. Стандартное содержание озона в столбе атмосферного воздуха составляет 300 добсонов.

Данный химический механизм модели был протестирован в более ранних исследованиях и верифицирован с данными наземных измерений. Механизм разработан на основе различных схем, но с явным и детализированным описанием сложных цепочек реакций, для понимания и более общего анализа взаимосвязей между химическими циклами различных газов.

В рамках данной работы механизм был дополнен химическими циклами биогенных углеводородов и органическими нитратами с учетом всех пероксирадикалов. Серные циклы включены для описания токсических выбросов химических предприятий, городских свалок и т.д.

Основное внимание уделено описанию антропогенных газовых выбросов, биогенные рассмотрены на примере метана, этана и их радикалов, остальные углеводороды более сложной группы описаны в группе ОTHС.

Вымывание растворимых газов и их перенос к земной поверхности атмосферными гидрометеорами параметризуется как функция разрушения газа.

Для анализа состава химических выбросов газов в регионе С-Петербурга использовалась база данных о составе выбросов в Европейских городах [3].

Во-первых, целесообразно рассматривать трансформацию примесей в городе на уровне 350 метров, т.к. источники антропогенных выбросов – заводские трубы располагаются, как правило, на высоте 100 метров, а автомобильные выбросы рассеиваются в вертикальном и горизонтальном направлениях. Тяжелые примеси не достигают более высоких слоев ПСА, а легкая примесь успевает рассеяться в нижних слоях ПСА.

Во-вторых, каждый отдельный мегаполис имеет собственный химический режим ПСА, в зависимости от характерных источников выбросов и климатических особенностей. Для определения оптимальных условий проведения модельных экспериментов в Санкт-Петербурге, а именно, оценки потоков антропогенных загрязнителей с

поверхности мегаполиса был выполнен анализ данных Глобальной базы данных по выбросам с поверхности мегаполисов мира Global Emission Inventory 2005 европейского научного проекта MEGAPOLI, в которой представлены основные антропогенные газовые и аэрозольные выбросы [3].

Оказалось, что в Санкт-Петербурге выбросы метана доминируют над угарным газом, составляя 55% от общей доли выбросов.

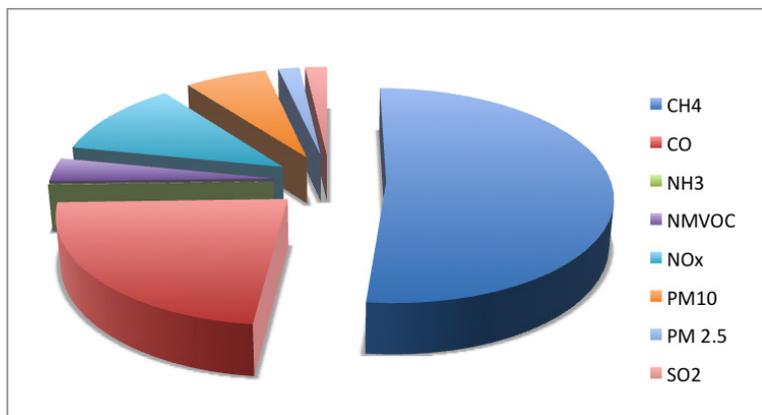


Рис. 2 – Вклад основных загрязняющих веществ в суммарные выбросы г. Санкт-Петербурга

Уровень угарного газа ниже, т.к. наблюдается тенденция к понижению загруженности центра города, путем выноса транспортных магистралей грузового автотранспорта за пределы центра города. Однако, заметно повышение концентрации окислов азота.

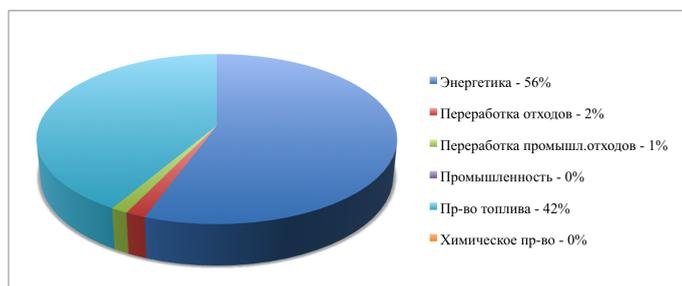
Причем, анализируя тип источников выбросов метана, как преобладающего газа, оказалось, что потоки выбросов от точечных источников (а – трубы котельных и отдельно стоящих заводов, аэрационные фонари, вентиляция) в Москве составляют 25% при вкладе площадных (б – промышленные зоны, автомагистрали) - 75%.



Рис. 3 – Соотношение выбросов метана от точечных и площадных источников в Санкт-Петербурге

Как показано на рисунке 3 вклад точечных источников более существенный – 57%.

(а)



(б)



(в)

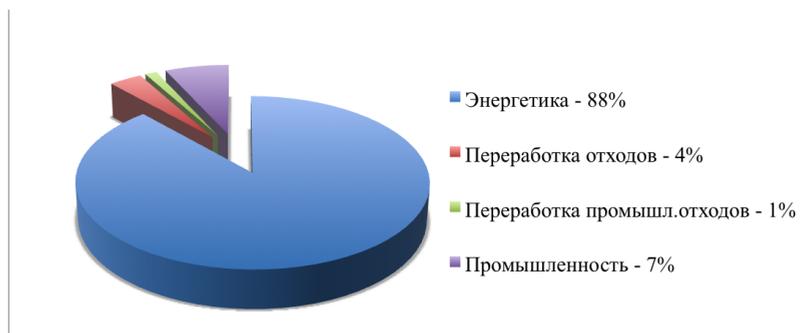


Рис. 4 – Соотношение выбросов от каждого сектора экономики в суммарные выбросы метана (а), угарного газа (б), оксидов азота (в) в Санкт-Петербурге

Из рис. 4 следует, что энергетический сектор Санкт-Петербурга производит около 80% выбросов оксидов азота и метана в атмосферу города.

Соединения азота, поступающие в атмосферу от объектов АТК, представлены в основном NO и NO<sub>2</sub>. Выделяемый в атмосферу монооксид азота под воздействием солнечного света интенсивно окисляется атмосферным кислородом до диоксида

азота. Кинетика дальнейших превращений диоксида азота определяется его способностью поглощать ультрафиолетовые лучи и диссоциировать на монооксид азота и атомарный кислород в процессах фотохимического смога.

(а)



(б)



(в)

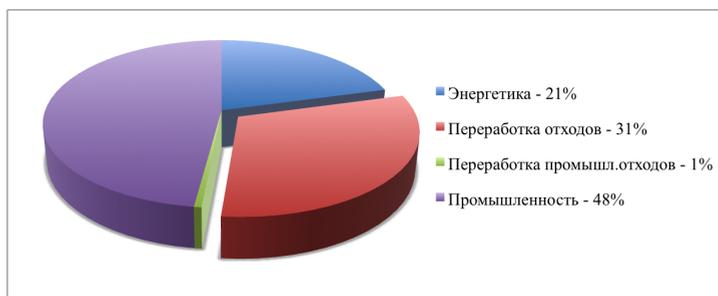


Рис. 5 – Соотношение выбросов от каждого сектора экономики в суммарные выбросы диоксида серы (а), углеводородов неметановой группы (б), аммиака (в) в Санкт-Петербурге

Выбросы углеводородов неметановой группы обусловлены работой химической промышленности.

Модельные эксперименты с использованием боксовой модели проводились с предположением, что при экстремальных метеорологических условиях, как в летний,

так и зимний периоды потоки выбросов антропогенных газов возрастают, что приводит к повышенным концентрациям, и в свою очередь к повышению температуры окружающей среды. Таким образом, были выбраны дни с максимальными значениями температуры +37С днем и среднесуточной +26С, наблюдаемые 7 августа 2010 года для экспериментов в летний период. Для зимнего периода была выбрана дата 18 февраля 2011 года с минимальной температурой -31С и среднесуточной -24С.

На рис. 6 приведен пример расчета траекторий переноса примеси (лагранжевый подход) выброшенной источником в районе города Санкт-Петербурга в отдельные рассматриваемые даты за 72 часа после выброса.

Суммарные антропогенные выбросы в полдень переносились в регионы Карелии и Мурманскую область с более низкими температурами воздуха, причем самые низкие выбросы от автотранспорта достигли тех же вертикальных слоев, что и высокие выбросы промышленных труб – 1800 м над поверхностью. Площадные суммарные выбросы перенеслись в средние слои тропосферы. Суммарный поток солнечной радиации уменьшался, следовательно, можно делать вывод о снижении интенсивности реакций фотодиссоциации в последующие 3 дня.

Рассматривая перенос примесей в зимний период, можно говорить о сильной приземной инверсии, суммарный поток примесей не подвергался вертикальному переносу, следовательно, все выброшенные газы накапливались в слое 300 метров от поверхности мегаполиса, при колебаниях температуры в районе 254 К. Величина потока солнечной радиации в 2 раза меньше, по сравнению с летним периодом.

Результаты выполненного в настоящей работе анализа показали, что, как следует из анализа траекторий переноса, у примеси с коротким временем жизни наблюдается быстрая дисперсия и небольшой вертикальный перенос, тем самым, определяя только локальное влияние на процессы в пограничном слое атмосферы. Примеси с более долгим временем жизни подвержены значительному вертикальному и горизонтальному переносу, тем самым, влияя на региональные и глобальные процессы в атмосфере соседних регионов.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 02.740.11.5199 от 09 ноября 2009 г.), в рамках реализации мероприятия «Проведение научных исследований коллективами под руководством приглашенных исследователей в области наук о Земле, экологии и рационального природопользования».

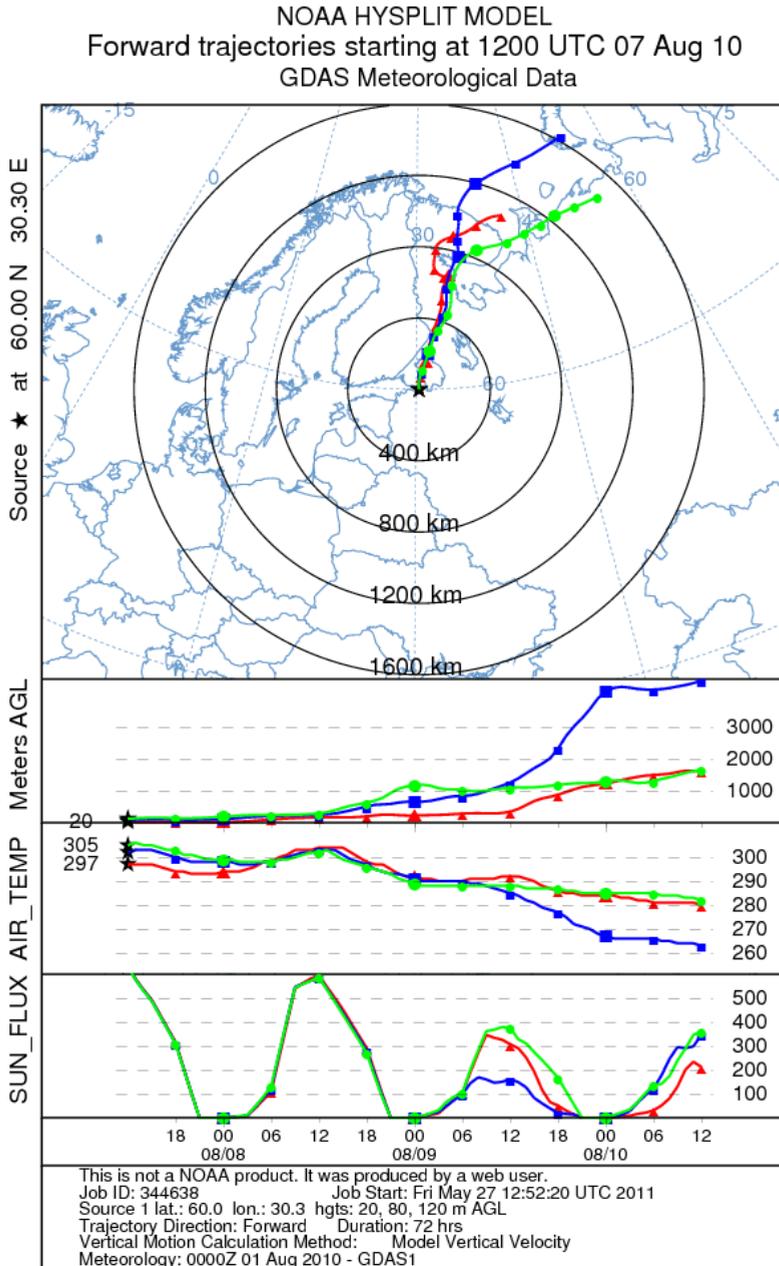


Рис. 6 – Траектории переноса примеси от источников в г. Санкт-Петербурге летом

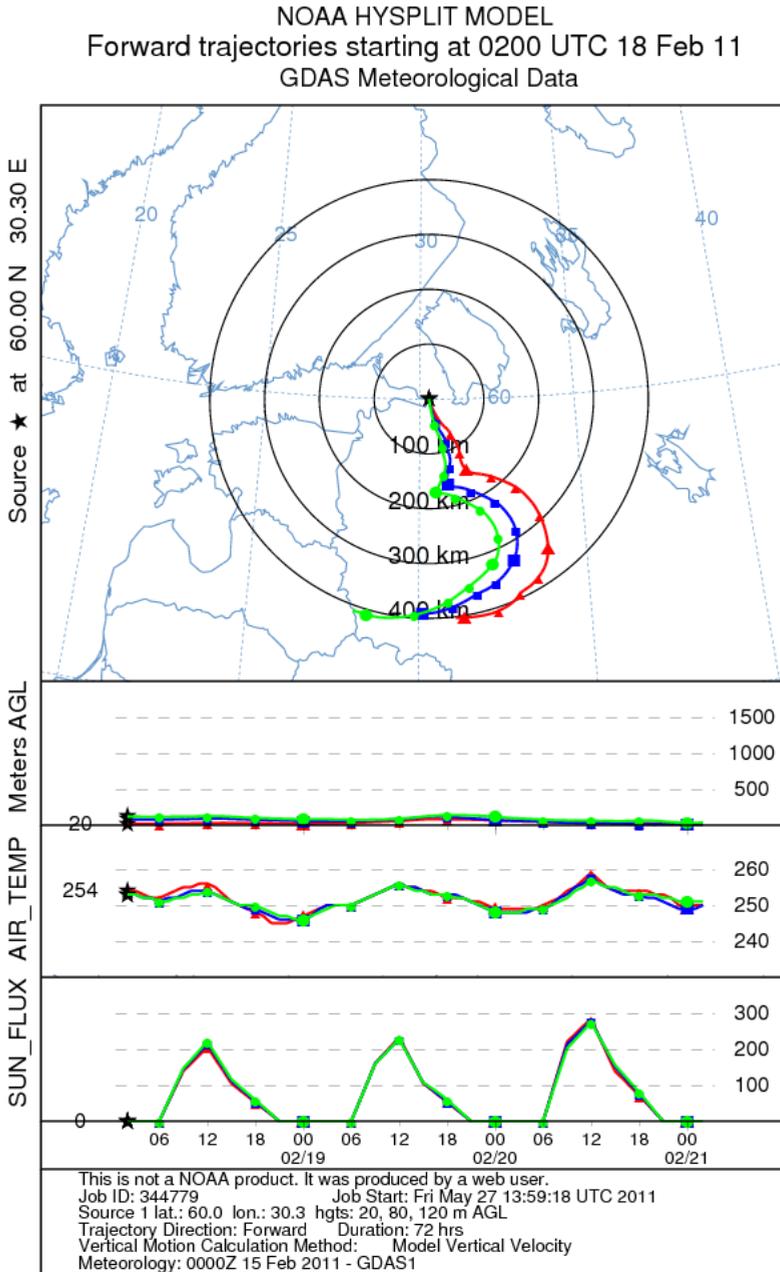


Рис. 7 – Дисперсия переноса примеси от источника в г. Санкт-Петербурге зимой

## Литература

1. *Baklanov, A.* Interactions between air quality and meteorology / A. Baklanov, A. Mahura // Deliverable d4.3, megapoli scientific report 10-10 [электронный ресурс]. – электронный журнал./ megapoli-13-реп, - dmi, 2010. – режим доступа:- [http://megapoli.dmi.dk/publ/megapoli\\_sr10-10.pdf](http://megapoli.dmi.dk/publ/megapoli_sr10-10.pdf)
2. Ежегодный обзор «состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2006 г.» [текст] / под ред. Э.Ю. Безуглая главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова.– СПб.: ГГО Росгидромета, 2008
3. Экогеохимия городских ландшафтов [текст] /Под ред. Н.С. Касимова. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 336 с.
4. Электронная база данных sedac центр социоэкономических данных // sedac [электронный ресурс]. – Электронная база данных. / Университет Колумбии . – Нью-Йорк.: Университет Колумбии , 2005. – <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/>
5. *Курбатова, А.С.* Экология города [текст]/ А.С. Курбатова, Башкин В.Н. – М.: Научный мир, 2004. – 624 с.
6. *Dvortsov V.I., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyayev S.P.* Parameterization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations - journal of geophysical research. 1998. Т. 103. № d17. С. 22047-22062.
7. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 2. С. 211.
8. *Гаврилова, Ю.В.* Модельное исследование влияния крупных городов на региональные аспекты погоды [текст] / Ю.В. Гаврилова, С.П. Смышляев, А.Г. Махура // Ученые записки РГГМУ. Научно-теоретический журнал. - 2010. – № 15. – с. 107 – 112
9. *Brasseur G.* Atmospheric chemistry and global change [текст]/ G. Brasseur, J. Orlando, G. Tyndall, Oxford university press, 1999
10. *Филиппенко А.П., Смышляев С.П., Блакитная П.А.* Химические механизмы трансформации токсичных газов в атмосфере // Ученые записки РГГМУ – 2010, № 15, с. 41–53.
11. *Panin, L.V.* Estimation of reliability of the data on pollutant content measured in the atmospheric surface layer in the troica experiments [текст] / L.V. Panin, N.F. Elansky, I.B. Belikov, I.G. Granberg, A.V. Andronova, Yu.I. Obvintsev, V.M. Bogdanov, Grisenko, A.M., V.S. Mozgrin // Izvestiya, Atmospheric and oceanic physics.- 2001.- vol. 37, suppl. 1, - с. 375–396.
12. *Смышляев, С.П.* Моделирование влияния изменений спектральных потоков солнечной радиации, вызванных солнечной активностью, на содержание атмосферного озона [текст] / С.П. Смышляев, В.Я. Галин, П.А. Зименко, А.П. Кудрявцев // Метеорология и гидрология.–2005.–п 8.–с.25 – 37

*Е.И. Хорева, С.В. Мостаманди, Л. Ронту, А.А. Бакланов*

### **ПРЯМЫЕ АЭРОЗОЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ОДНОМЕРНОЙ ВЕРСИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ HIRLAM**

*E.I. Khoreva, S.V. Mostamandi, L. Rontu, A.A. Baklanov*

### **DIRECT AEROSOL EFFECTS IN THE ONE-DIMENSIONAL REGIONAL METEOROLOGICAL MODEL HIRLAM**

*Повышенные содержания антропогенных аэрозолей в крупных городах приводят к прямому воздействию на радиационный баланс путем поглощения и рассеяния коротковолновой и длинноволновой радиации. С помощью одномерной версии региональной метеорологической модели HIRLAM с модифицированной радиационной схемой для учета прямых аэрозольных эффектов, разработанной в Датском Метеорологическом Институте, был произведен расчет и анализ прямого воздействия при фоновых и повышенных содержаниях антропогенных аэрозолей - органического углерода, сажевого и сульфатного аэрозоля - в Соданкюля (Финляндия).*

*Ключевые слова: прямые эффекты аэрозолей, радиационный баланс, антропогенные аэрозоли.*

*The high contents of anthropogenic aerosols in the megacities impact directly on the radiative balance via absorption and scattering of shortwave and longwave radiation. Direct effects in the background and increased levels of anthropogenic aerosols - organic carbon, soot and sulfate aerosols - in Sodankyl (Finland) was calculated and analysis by a one-dimensional regional meteorological model HIRLAM with modified radiation scheme developed at the Danish Meteorological Institute,*

*Key words: direct effects of aerosols, radiation balance, anthropogenic aerosols.*

### **Введение**

Для надежной оценки возможных изменений климата необходимо обеспечить достаточно точный учет в моделях климата основных факторов, определяющих радиационный теплообмен в атмосфере. В безоблачных условиях важной составляющей атмосферы, формирующей радиационный режим наряду с поглощающими атмосферными газами, как в глобальном, так и в региональном масштабе, является аэрозоль [1,2,3]. Под прямыми аэрозольными эффектами подразумевается прямое влияние аэрозолей на радиационный баланс системы «земная поверхность — атмосфера» посредством перераспределения коротковолнового солнечного и теплового излучений в этой системе за счет рассеяния и поглощения на аэрозольных частицах, неравномерно распределенных в земной атмосфере. Косвенные и полупрямые эффекты, связанные с фазовыми переходами воды в атмосфере, в частности при облако- и осадкообразовании, в данном эксперименте рассматриваться не будут. Считается, что в глобальном масштабе воздействие антропогенных аэрозолей на коротковолновую радиацию (поглощение) компенсирует часть нагрева, вызванного парниковыми газами. В региональном масштабе, особенно вблизи мегаполи-

сов, существует некоторая неопределенность, связанная с аэрозольными эффектами [1,4]. Эта неопределенность объясняется большей временной изменчивостью, неоднородностью распределения аэрозолей, по сравнению с парниковыми газами, а также существованием обратных связей между химическими процессами в атмосфере и приповерхностном слое подстилающей поверхности [2].

Радиационные свойства аэрозолей зависят от многих факторов – от размера, химического состава, от состояния смешивания (или иначе – как компоненты аэрозолей смешаны друг с другом), от гигроскопичности. В данном эксперименте рассмотрены радиационные эффекты трех основных антропогенных аэрозолей – органический углерод (ОУ), сульфатный и сажевый аэрозоль. К источникам антропогенных (промышленных) выбросов относят автотранспорт, тепловые электростанции, промышленные предприятия, сжигание мусора и обогрев помещений [5]. Данные виды источников широко представлены в крупных городах, где повышенные концентрации выбросов, в том числе аэрозолей, приводят к ярко выраженному радиационному воздействию.

Целью данного исследования является изучение прямых эффектов основных антропогенных аэрозолей с помощью одномерной версии метеорологической модели HIRLAM [6,7]. Одномерная версия модели, в отличие от трехмерной, используется для проведения идеализированных экспериментов и новых модельных разработок. Используемая в эксперименте версия включает в себя основной пакет физики HIRLAM вместе с прямыми и полупрямыми эффектами, но не включает всей газофазной химии и косвенных аэрозольных эффектов, что позволяет сосредоточиться на цели эксперимента.

### Методика и данные

Учет прямых и полупрямых эффектов основан на схеме, недавно разработанной в ДМИ. Подпрограмма для расчета прямого аэрозольного эффекта сочетает в себе хорошую скорость вычисления и точность. Так как модель HIRLAM в целом предназначена для очень быстрых вычислений излучения и включает только одну спектральную полосу в коротковолновом спектральном интервале и одну полосу в длинноволновой области спектра [8,9], было бы излишним совмещать данную схему с высокой степенью детализации расчета аэрозольного радиационного воздействия. Таким образом, расчет прямого эффекта аэрозолей на коротковолновом участке спектра осуществляется стандартным 2-поточковым приближением для расчетов средних оптических свойств аэрозолей, взвешенных по всему участку солнечного спектра. Точность этого предположения была проверена путем расчета пропускания и отражения 30-поточковым приближением с более чем 2000 длинами волн в коротковолновом спектре и сопоставления результатов с дискретными расчетами. Было установлено, что разница между двумя методами расчета в большинстве случаев находится в пределах нескольких процентов. Только при содержании сажи (или черного углерода)  $> 0,3$  г/м<sup>2</sup> подпрограмма не воспроизводит расчеты радиационного переноса с должной точностью. Предположительно это происходит из-за неадекватности 2-поточкового приближения в случае с оптически толстым слоем и низким альбедо однократного рассеяния [10]. Однако, коэффициент пропускания таких слоев является очень низким и эта ошибка не влияет на абсолютные значения коротковолнового радиационного воздействия. Расчеты

длинноволнового радиационного переноса также выполняются в виде 2-поточкового приближения, причем оптические свойства аэрозолей взвешены только в длинноволновой области окна прозрачности. Таким образом, было сделано предположение о незначительном длинноволновом радиационном воздействии аэрозоля, так как в данной области спектра доминирует эффект парниковых газов. Это предположение также основано на исследованиях детальных расчетов радиационного переноса.

Для осуществления данного эксперимента были использованы данные о вертикальном распределении удельной массы сажи, ОУ и сульфатного аэрозолей из аэрозольной климатической модели с разрешением 4 по долготе и 5 по широте [11], доступные на сайте Национального комитета по астронавтике и исследованию космического пространства (NASA). **оценки антропогенных выбросов аэрозолей** произведены на основе статистики употребления топлива и включают в себя временные изменения в технологии использования ископаемых видов топлива [12]. Источники сажи и ОУ - использование ископаемого топлива и сжигание биомассы, включая сельскохозяйственные пожары, которые происходят в основном в тропиках, и лесные пожары, которые в Азии и Северной Америки. Аэрозоли от биотоплива не включены. Глобальное распределение аэрозолей вычислены моделью переноса для 1850, 1875, 1900, 1925, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 годов, линейно интерполируются между этими датами, и принимается постоянной после 1990 года.

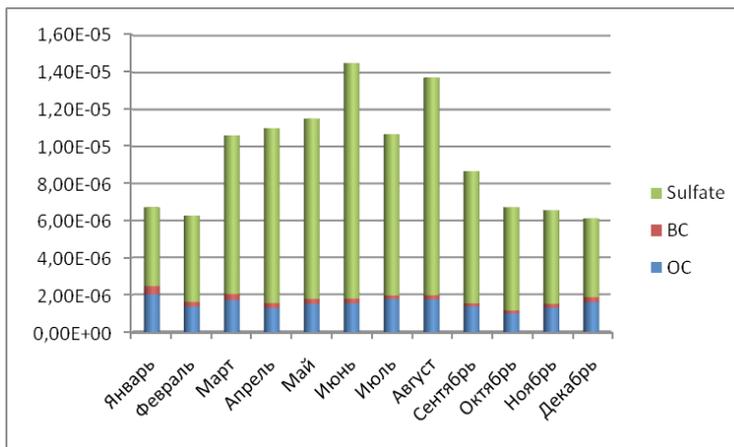


Рис. 1 – Общее содержание антропогенных аэрозолей по месяцам на 1990 год (сажи – BC, ОУ – OC и Sulfate – сульфатный аэрозоль) в единицах кг/м<sup>3</sup>

На рис. 1 представлены данные об общем содержании антропогенных аэрозолей в столбе атмосферы над населенным пунктом Соданкюля (67°25'00" с. ш. 26°35'35" в.д.), расположенным в провинции Лапландия (Финляндия), с площадью— 12 415 км<sup>2</sup> и населением 8801 чел. Так как данный населенный пункт не является мегаполисом, можно предположить, что представленное содержание является фоновым и для расчета аэрозольных эффектов необходимо увеличить его в n раз. Таким образом, моделирование осуществлено в несколько этапов: случай с нулевыми удельными массами аэрозолей

на всех уровнях; случай с фоновым (типичными для данного пункта) содержанием антропогенных аэрозолей; случаи с 5, 10 и 30 кратным увеличением содержания аэрозоля с целью исследования влияния на радиацию средних и повышенных выбросов, свойственных крупным городам. Также рассмотрены случаи с учетом каждого типа аэрозоля в отдельности. Для данного эксперимента был выбран летний период с отсутствием облачности. Моделирование производилось с 00 часов по UTC на период 24 часа. Органический углерод и сульфатный аэрозоль в данной радиационной схеме объединяются в единый тип — растворимых в воде аэрозолей. На рис. 2 и 3 изображены вертикальные профили содержания аэрозолей, соответствующие разным месяцам. В большинстве случаев максимум содержания один и приходится на слои у земли, однако, встречаются распределения с несколькими максимумами, один из которых приближен к земле.

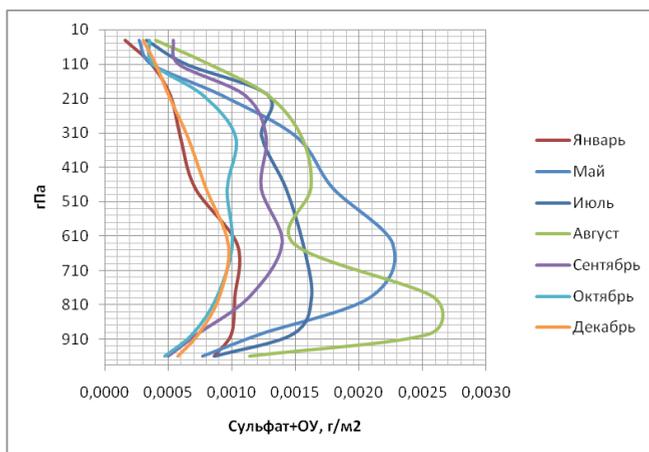


Рис. 2 — Вертикальное распределение растворимых аэрозолей по месяцам за 1990 г.

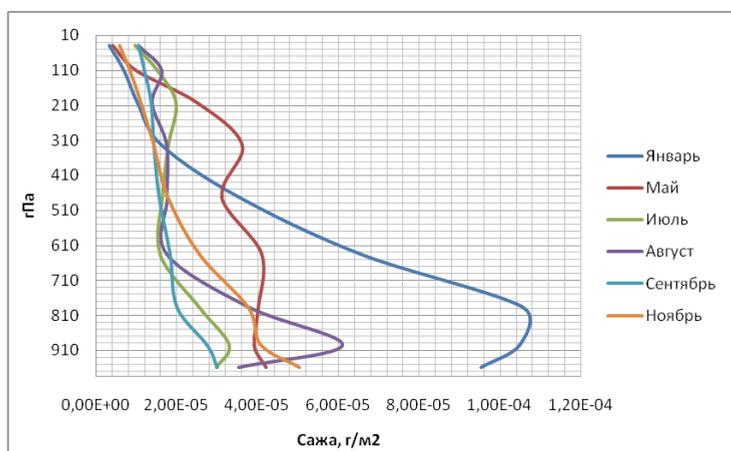


Рис. 3 — Вертикальное распределение сажевого аэрозоля по месяцам

**Основные результаты**

Как и следовало ожидать, при сравнении результатов моделирования первых двух случаев (с нулевым содержанием аэрозолей и фоновым содержанием) не наблюдалось каких-либо радиационных эффектов из-за незначительности содержания взвешенных частиц за пределами крупных городов. На рис. 4 и 5 приведены результаты моделирования случаев с увеличенным содержанием всех антропогенных аэрозолей в 10 и 30 раз. Наибольшее влияние аэрозоли оказывают на коротковолновую радиацию, количество которой тем меньше чем больше содержание аэрозолей, что происходит за счет увеличения рассеяния и поглощения аэрозолями. Максимальное сокращение наблюдается в местный полдень и составляет порядка  $100 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 4). Эффект на длинноволновую радиацию, как и ожидалось, меньше и составляет до  $8 \text{ Вт/м}^2$ , что вызвано небольшим увеличением встречного излучения атмосферы (рис. 4).

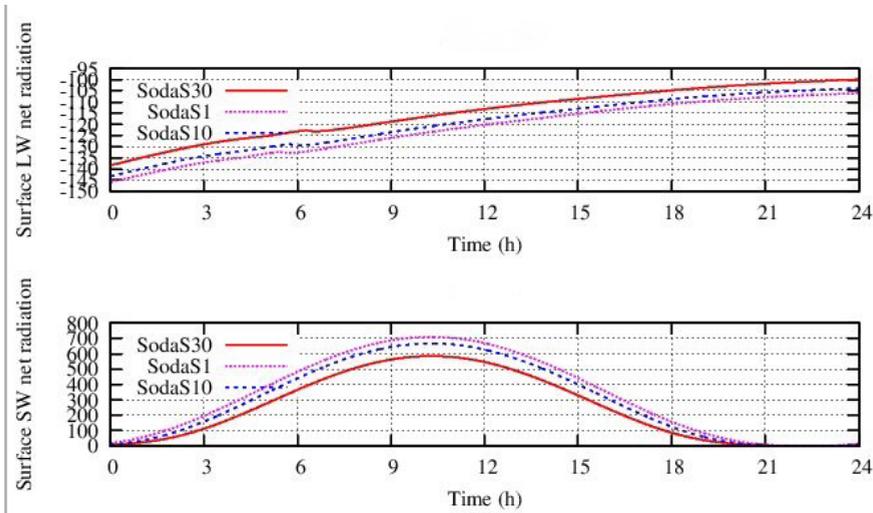


Рис. 4 – Суточный ход баланса длинноволновой (LW) и коротковолновой (SW) радиации у поверхности с разным содержанием антропогенных аэрозолей: фоновом содержании сажевого, сульфатного аэрозолей и OY (SodaS1), при увеличенном в 10 (SodaS10) и 30 раз (SodaS30)

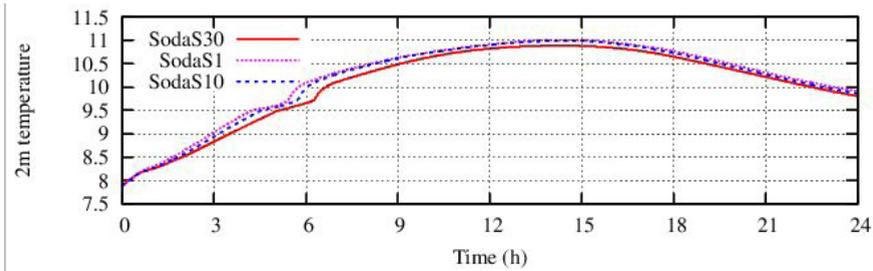


Рис. 5 – Суточный ход температуры на высоте 2 м с разным содержанием антропогенных аэрозолей в атмосфере: фоновое содержание сажевого, сульфатного аэрозолей и OY (SodaS1), увеличенное в 10 раз (SodaS10) и в 30 раз (SodaS30)

Температура воздуха на 2 м также чувствительна к увеличению концентрации антропогенных аэрозолей – наблюдается небольшое охлаждение порядка  $0,1^{\circ}\text{C}$  при максимально заданном увеличении содержания антропогенных аэрозолей (рис.5).

Далее рассмотрим случаи, когда учитывалось лишь увеличение содержания одного типа аэрозоля. Итак, при увеличенном в 30 раз содержании сажевого аэрозоля наблюдается намного меньший эффект на коротковолновую радиацию (порядка  $20 \text{ Вт/м}^2$ ) и не наблюдается воздействия на длинноволновую область спектра излучения (рис.6).

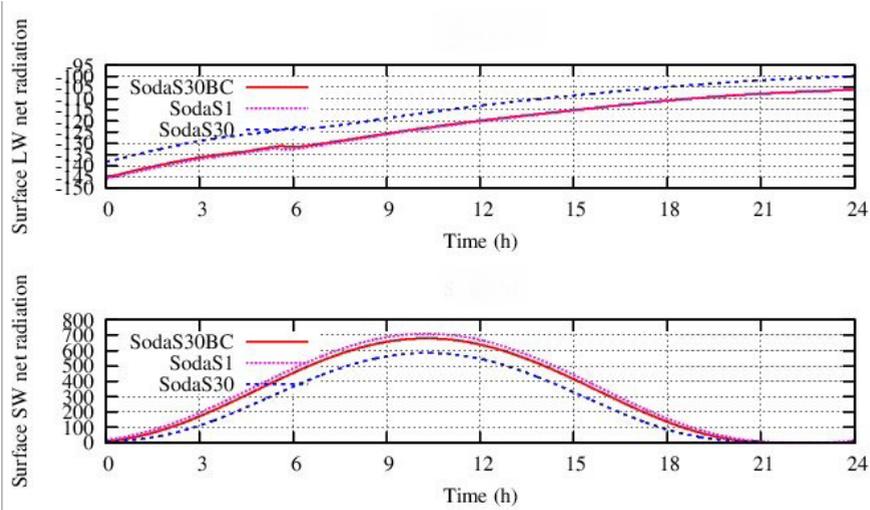


Рис. 6 – Суточный ход баланса длинноволновой (LW) и коротковолновой (SW) радиации у поверхности с разным содержанием антропогенных аэрозолей: фоновом содержании сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), при увеличенном в 30 раз (SodaS30) и увеличенным в 30 раз содержанием сажевого аэрозоля (SodaS30BC)

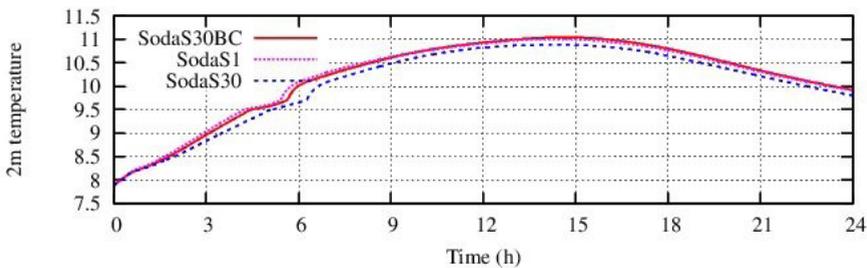


Рис. 7 – Суточный ход температуры на высоте 2 м с разным содержанием антропогенных аэрозолей в атмосфере: фоновое содержание сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), увеличенное в 30 раз (SodaS30) увеличенным в 30 раз содержанием сажевого аэрозоля (SodaS30BC)

Сажевый аэрозоль с увеличенным в 30 раз фоновым значением в данном эксперименте не оказывает заметного воздействия на температуру (рис. 7).

При учете увеличенного в 30 раз сульфатного аэрозоля наблюдается эффект, сравнимый с эффектом, наблюдаемым при увеличении всех 3 типов аэрозолей, как на коротковолновую, так и на длинноволновую радиацию.

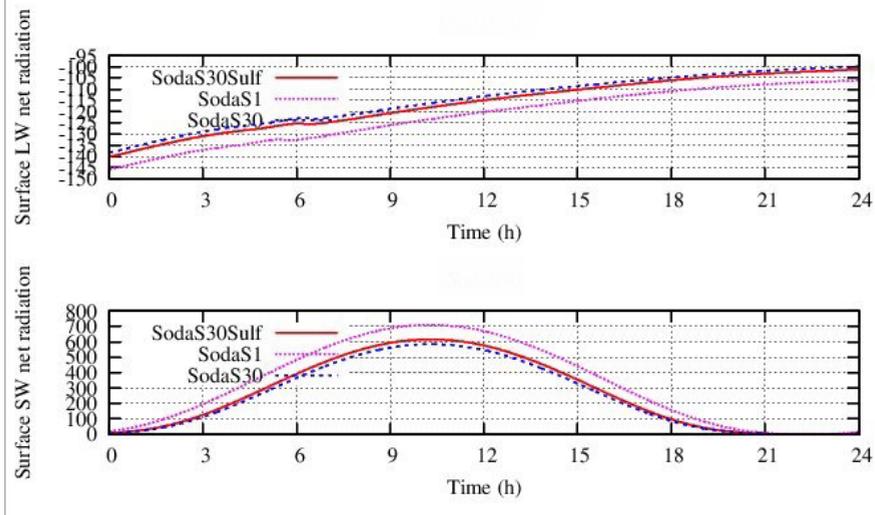


Рис. 8 – Суточный ход баланса длинноволновой (LW) и коротковолновой (SW) радиации у поверхности с разным содержанием антропогенных аэрозолей: фоновом содержании сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), при увеличенном в 30 раз (SodaS30) и увеличенным в 30 раз содержанием сульфатного аэрозоля (SodaS30Sulf)

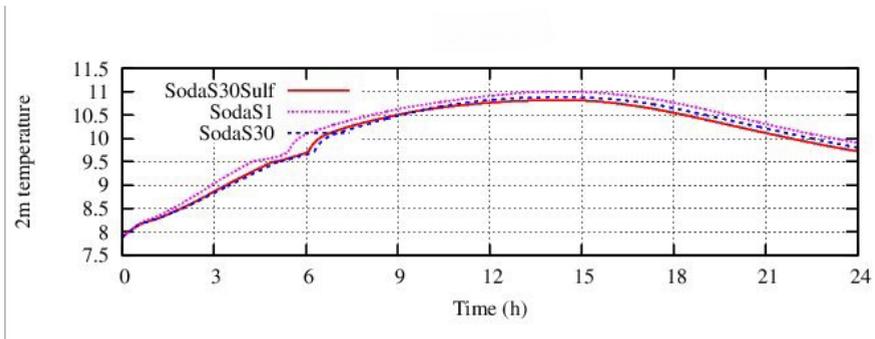


Рис. 9 – Суточных ход температуры на высоте 2 м с разным содержанием антропогенных аэрозолей в атмосфере: фоновое содержание сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), увеличенное в 30 раз (SodaS30) увеличенным в 30 раз содержанием сульфатного аэрозоля (SodaS30Sulf)

При учете только сульфатного аэрозоля, наблюдается более сильный охлаждающий эффект, чем при учете всех трех рассматриваемых антропогенных аэрозолей. Вероятно, сажевые аэрозоли сглаживают вызываемое сульфатными частицами уменьшение температуры.

Отдельно взятый органический углерод оказывает очень слабый эффект как на длинноволновую, так и на коротковолновую радиацию (рис. 10), и, следовательно, на температуру (рис. 11)

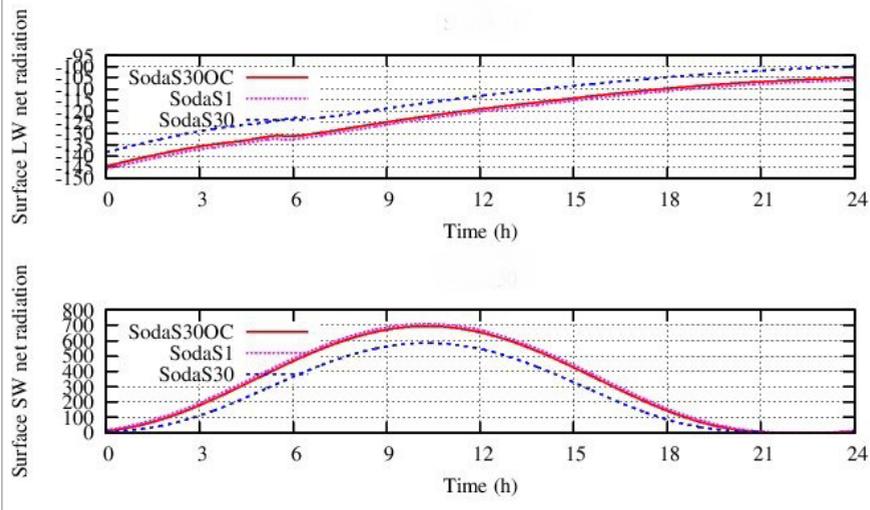


Рис. 10 – Суточный ход баланса длинноволновой (LW) и коротковолновой (SW) радиации у поверхности с разным содержанием антропогенных аэрозолей: фоновом содержании сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), при увеличенном в 30 раз (SodaS30) и увеличенным в 30 раз содержанием ОУ (SodaS30BC)

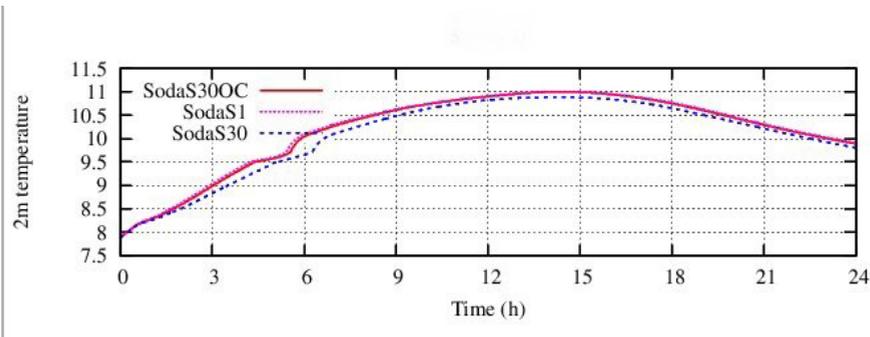


Рис. 11 – Суточный ход температуры на высоте 2 м с разным содержанием антропогенных аэрозолей в атмосфере: фоновое содержание сажевого, сульфатного аэрозолей и ОУ (SodaS1), увеличенное в 30 раз (SodaS30) и увеличенным в 30 раз содержанием ОУ (SodaS30OC)

**Заключение**

Данный эксперимент подтвердил наличие прямого эффекта в атмосфере, однако, для этого необходимо было значительно увеличить содержание антропогенных аэрозолей. При одновременном увеличении всех трех типов аэрозолей наблюдалось линейное уменьшение общей коротковолновой радиации на уровне земли. Несмотря

на выраженную способность сажевого аэрозоля поглощать радиацию, при 30 увеличении этот аэрозоль не вызвал значительных эффектов, по сравнению с сульфатным аэрозолем. Не обнаружилось значительных эффектов при отдельном увеличении содержания органического углерода.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 02.740.11.5199 от 09 ноября 2009 г.), в рамках реализации мероприятия «Проведение научных исследований коллективами под руководством приглашенных исследователей в области наук о Земле, экологии и рационального природопользования».

### Литература

1. *Jacobson M.Z.* "Atmospheric Pollution: history, science, regulation"/ Mark Z. Jacobson. - Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2002. — 399
2. *Seinfeld, J.H., and Pandis, S.N.*: Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change. John Wiley and Sons, Inc., NY, 1998.
3. *Baltensperger, U., Nyeki, S., Kalberer, M.* Atmospheric Particulate Matter, Hewitt C.N. and Jackson, A. The Handbook of Atmospheric Sciences, Blackwell, 228-254 (2003).
4. *Flagan, Richard C. and Seinfeld, John H.* (1988) Fundamentals of air pollution engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. ISBN 0-13-332537-7
5. *Ландсберг Г.Е.* Климат города / пер. с англ. Под ред. А.С. Дубова. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 247 с.
6. *Vaklanov A.* (2008): Integrated Meteorological and Atmospheric Chemical Transport Modelling: Perspectives and Strategy for HIRLAM/HARMONIE. HIRLAM Newsletter, 53: 68-78
7. *Korsholm U.S.* (2009): Integrated modeling of aerosol indirect effects – development and application of a chemical weather model. PhD thesis. DMI scientific report 01-09.
8. *Savijarvi, H.* (1990): Fast radiation parameterization schemes for mesoscale and short-range forecast models. J. Appl. Meteor., 29, 437-447.
9. *Wesely, M. L.* (1989): Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. Atmos. Environ., 23, 1293-1304
10. *Chen, B.K. Stamnes and J.J. Stamnes* (2001): Validity of the Diffusion Approximation in Bio-Optical Imaging, Appl. Opt., 40 (34), 6356-6366.
11. *Koch, D.* 2001: Transport and direct radiative forcing of carbonaceous and sulfate aerosols in the GISS GCM. J. Geophys. Res., 106, 20311-20332, doi:10.1029/2001JD900038.
12. *Novakov, T., D.A. Hegg, and P.V. Hobbs,* Airborne measurements of carbonaceous aerosols on the East Coast of the United States, J. Geophys. Res., 102, 30023-30030, 1997

*А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая, Н.А. Саноцкая, В.А. Драбенко, А.А. Ошуркова*

## МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОБРАЩЕНИЯ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

*A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Y.B. Rzhonsnitskaya, N.A. Sanotskaya, V.A. Drabenko, A.A. Oshurkova*

## MINIMIZATION OF WEAK BACKSCATTERING SIGNALS INVERTING ERRORS

*Рассматривается метод интерпретации лидарной информации, принятой с расстояний с минимальными систематическими погрешностями. Метод был успешно применен для обработки данных для типичных атмосферных условий.*

*Ключевые слова: лидарная информация, обратная задача, однородная атмосфера, фоновая засветка, минимальные систематические погрешности*

*It is considered the method of interpretation of lidar information received from the distances with minimal systematic errors. The method was used successfully for data processing for typical atmospheric scenarios.*

*Key words: lidar information, inverse problem, homogeneous atmosphere, background light, minimal systematic errors*

Обычно интерпретация данных лидарного зондирования атмосферного аэрозоля основывается на обращении лидарного уравнения, записанного для незначительной фоновой засветки [1-3]. Это уравнение связывает сигнал обратного рассеяния с коэффициентом обратного рассеяния  $\beta$  и коэффициентом ослабления  $\sigma$ . В общем случае фоновую засветку следует учитывать [4, 5].

В работе рассматривается метод интерпретации данных лидарного зондирования атмосферы с учетом фоновой засветки и с минимизацией систематической погрешности.

### 1. Метод интерпретации данных лидарных измерений с учетом фоновой засветки и с минимизацией погрешности

В случае однородной атмосферы для интерпретации данных лидарного зондирования атмосферного аэрозоля можно записать:

$$\delta_i = P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i, \quad (1)$$

где  $P_*$  – фоновая засветка,  $B = A\beta$ ,  $A$  – постоянная лидара,  $R_i$  – расстояние зондирования.

Поскольку мощность сигнала  $P_i$  измеряется с погрешностью, величина  $\delta_i$ , характеризующая эту погрешность, не равна нулю. Задача состоит в том, чтобы найти неизвестные постоянные  $P_*$ ,  $B$ ,  $\sigma$ , минимизируя сумму:

$$\delta^2 = \sum_1^n \delta_i^2 = \sum_1^n \left( P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right)^2. \quad (2)$$

Это можно сделать, решая систему уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_1^n \left( P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right) &= 0, \\ \sum_1^n \left( P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right) \frac{1}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) &= 0, \\ \sum_1^n \left( P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right) \frac{1}{R_i} \exp(-2\sigma R_i) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для решения полученной системы (3) в случае малых величин  $\sigma$  работы [4] ее можно линеаризовать, учитывая приближенное равенство:

$$\exp(-2\sigma R_i) = 1 - 2\sigma R_i. \quad (4)$$

Влияние систематического искажения сигнала проанализировано в работе [6], для его минимизации в настоящей работе рассматриваются расстояния зондирования, начиная с некоторого достаточно большого значения  $R_1$ . Это значение отыскивается из условия постоянства определяемых величин  $P_*$ ,  $B$ ,  $\sigma$ , на трассе зондирования.

Решение сформулированной задачи относительно величины  $P_*$ , которая не должна зависеть от расстояния зондирования  $R_i$ , имеет вид:

$$P_* = D_1 / D_0, \quad (5)$$

где

$$D_0 = \begin{vmatrix} n & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i} \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \end{vmatrix}, \quad D_1 = \begin{vmatrix} \sum_1^n P_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i} \\ \sum_1^n \frac{P_i}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \\ \sum_1^n \frac{P_i}{R_i} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \end{vmatrix}.$$

Аналогично можно определить величины  $B$ ,  $\sigma$ , которые также не должны зависеть от расстояния зондирования  $R_i$ .

## 2. Результаты интерпретации данных лидарных измерений

Для минимизации влияния искажения сигнала работы [4] выбраны расстояния зондирования, начиная с  $R_1 = 2500$  м.

На рис. 1а представлены соответствующие результаты расчетов величины фоновой засветки  $P_*$ . Для сравнения на рисунке 1б представлены результаты расчетов величины фоновой засветки для  $R_1 = 750$  м. Очевидно, что выбор расстояния  $R_1 = 2500$  м решает задачу минимизации влияния искажения, в отличие от выбора расстояния  $R_1 = 750$  м.

С учетом результатов расчетов величины фоновой засветки, на рис. 2 представлены результаты расчетов коэффициента ослабления:

$$\sigma = \frac{1}{2} \left\{ n - \frac{\sum_1^n (P_i - P_*) R_i^2}{(P_0 - P_*) R_0^2} \right\} / \sum_1^n (R_i - R_0), \quad (6)$$

который равен  $0,033 \text{ км}^{-1}$ .

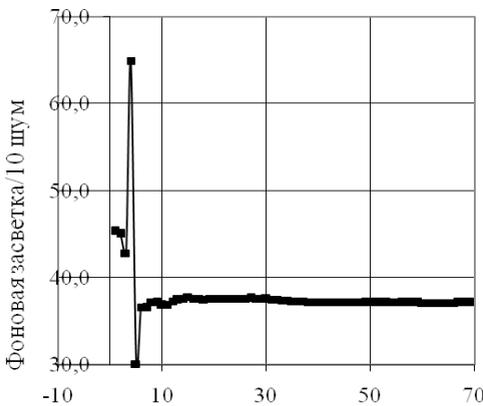
С учетом найденных значений  $\sigma$ ,  $P_*$  можно определить величину  $B$ :

$$B = \frac{\sum_1^n (P_i - P_*) \exp(-2\sigma R_i) / R_i^2}{\sum_1^n \exp(-4\sigma R_i) / R_i^4}. \quad (7)$$

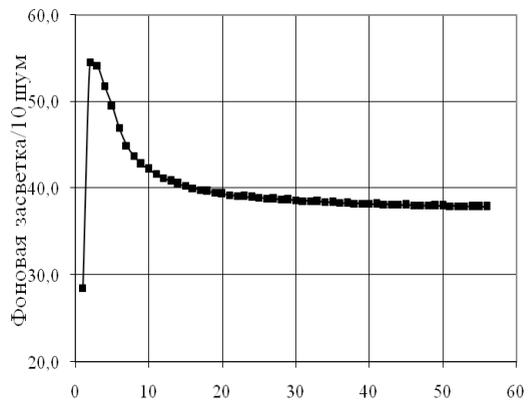
На рис. 3 представлены результаты расчетов величины  $\frac{B_i - B}{B}$ , причем в относительных единицах  $B = 60,9$ . По измеренному эхо-сигналу и найденным константам можно оценить шум сигнала. Рис. 4 показывает возможность использовать для оценки шума известную формулу:

$$\delta_i = C \sqrt{P_i}. \quad (8)$$

а)



б)



Номер шага/2, шаг 75 м

Номер шага/3

Рис. 1 – результаты расчетов величины  $P_*$

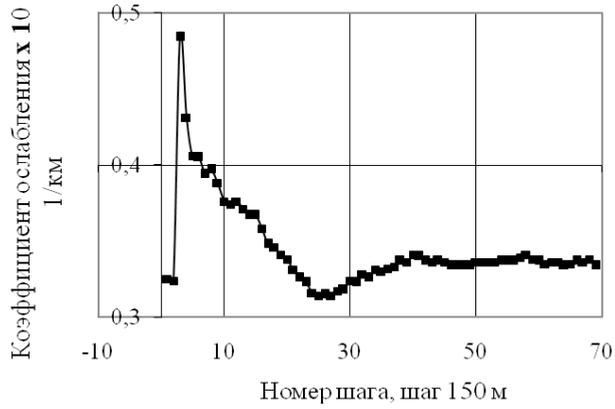


Рис. 2 – Результаты расчетов коэффициента ослабления

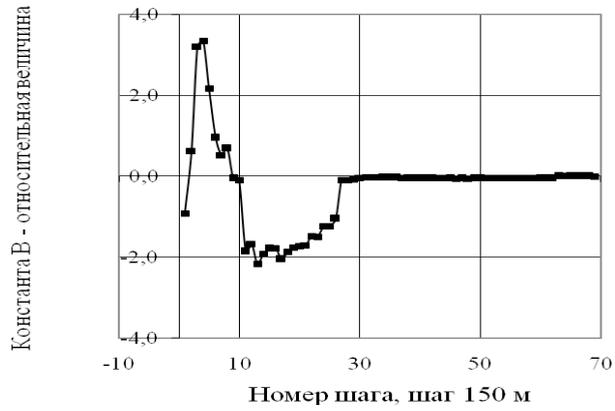


Рис. 3 – Результаты определения величины B

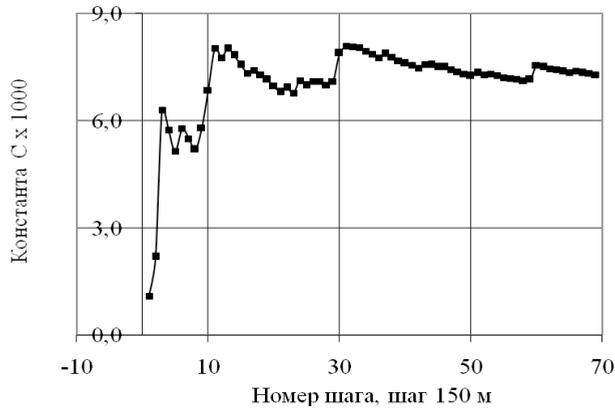


Рис. 4 – Результаты определения связи шума с мощностью эхо-сигнала

В работе [7] осуществлен анализ результатов зондирования без привлечения степенной зависимости погрешности измерений сигнала от его мощности. Сравнение результатов настоящей работы с результатами работы [7] показывает удовлетворительную сопоставимость двух приближений.

### **Заключение**

В работе развито направление решения обратных задач лидарного зондирования с учетом фоновой засветки. Разработан метод интерпретации данных лидарных измерений, минимизирующий систематические погрешности определения коэффициента ослабления, фоновой засветки. Разработанный метод успешно применен для типичных атмосферных условий и для реалистических характеристик аппаратуры.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № 16.740.11.0619 от 31 мая 2011 г.) по направлению «Геология, горное дело, геохимия, геофизика, география и гидрология суши, океанология, физика атмосферы».

### **Литература**

1. *Egorov A.D., Perelman A.Y., Kaziakhmedov T.B.* Estimate of aerosol microstructure based on integral method of multiposition sounding of the atmosphere // *Atmospheric and Oceanic Optics.* – 1997. № 10. – P. 729 – 732.
2. *Egorov A.D., Potapova I.A., Shchukin G.G.* Lidar methods for probing an atmospheric aerosol // *Journal of Optical Technology.* – 2001. № 68. – P. 801 – 804.
3. *Егоров А.Д.* Методы многопозиционнолидарного зондирования атмосферы // *Ученые записки РГГМУ.* – 2010. № 16. – С. 87 – 93.
4. *Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B.* Atmospheric aerosols measurements and reliability problem // *International Journal of Remote Sensing.* – 2008. № 29. – P. 2449–2468.
5. *Ржонсницкая Ю.Б.* Погрешность определения фоновой засветки методом двухпозиционного лидарного зондирования атмосферы: труды ГГО. – 2010. Вып. 562. – С. 258–266.
6. *Потапова И.А.* Оценка инструментальных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // *Ученые записки РГГМУ.* – 2009. № 9. – С. 86 – 90.
7. *Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B.* The treatment of low-power lidar signals // *J. Opt. Technol.* – 2007. № 74. – P. 665 – 668.

*П.А. Блаkitная, С.П. Смышляев, В.Я. Галин*

## **ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ В ЗОНАХ ИНТЕНСИВНЫХ ЭМИССИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА СОСТАВ И ТЕМПЕРАТУРУ АТМОСФЕРЫ**

*P.A. Blakitnaya, S.P. Smyshlyayev, V.Ya. Galin*

## **IMPACT OF TOXIC GASES EMISSIONS IN THE REGIONS WITH INTENSIVE POLLUTIONS SOURCES ON THE ATMOSPHERIC CHEMICAL COMPOSITION AND TEMPERATURE**

*Для исследования влияния выбросов токсичных элементов на изменение температуры и состава атмосферы в настоящей работе данные о поверхностных выбросах окислов азота, угарного газа и углеводов в зонах повышенного загрязнения добавлялись в химический блок химико-климатической модели к естественным природным нижним граничным условиям. Рассчитанные с учетом дополнительного в зонах загрязнения источника концентрации озона и других радиационно-активных газов по описанной выше методике влияют на изменение температуры и циркуляции атмосферы и являются предметом для воздействия возникающих обратных связей.*

*Ключевые слова: токсичные газы, атмосфера, атмосферные химические реакции, обратные связи*

*Data about surface emissions of toxic gases are implemented into chemical code of a chemical transport model to combine with natural sources in order to study toxic gases impact on the temperature and chemical composition variability. Calculated with additional emissions concentrations of ozone and other radiative gases are found to impact on the temperature and atmospheric circulation and may cause feedbacks between chemistry and meteorology.*

*Key words: toxic gases, atmosphere, atmospheric chemical reactions, feedbacks*

### **1. Введение**

В последнее время в мире отмечается тенденция увеличения выбросов химически активных газов в атмосферу, особенно в зонах с интенсивными источниками токсичных загрязнений [1]. При этом увеличивается как качественный состав, т.е. количество выбрасываемых в атмосферу газов, так и интенсивность их выбросов [2]. В таких условиях важным становится не только химический состав выбрасываемых в приземный слой атмосферы газов, но и их способность к химической трансформации в зонах выброса и подверженности к трансграничному переносу, т.е. их перемещения атмосферными потоками в другие регионы, не содержащие источников токсичных загрязнений.

Особенности протекания химических реакций в зонах с интенсивными источниками токсичных загрязнений приводят, во-первых, к формированию новых химических газовых составляющих в результате химических реакций с участием газов, входящих в токсичные выбросы в подобных зонах [3], а во-вторых, к трансграничному переносу новых токсично опасных газов в зоны, не содержащие токсичных выбросов [4].

Кроме того, попадающие в атмосферу в загрязненных зонах газы, если они не подвергаются быстрой химической трансформации в районе выбросов, т.е. обладают долгим химическим временем жизни [5], могут подвергаться и вертикальному атмосферному переносу [6]. Попадая в верхнюю тропосферу и стратосферу, эти газы могут принимать участие в химических реакциях, которые существенно отличаются от реакций, происходящих в приземном слое атмосферы [7]. Кроме того, их химическое время жизни в средней и верхней атмосфере может быть существенно больше, чем в нижней тропосфере и они могут рассеиваться по всему Земному шару и, следовательно, иметь глобальные эффекты.

Для исследования глобальных эффектов влияния выбросов химически активных газов в районах сильного загрязнения в настоящей работе используется глобальная химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы, в которой к фоновым нижним граничным условиям добавлены потоки химически активных загрязнителей, соответствующие зонам с интенсивным токсичным загрязнением.

## 2. Используемая модель

Используемый комплекс моделей, объединенных в ХКМ, охватывает высотный диапазон от земной поверхности до 90 км с переменным шагом по высоте. Из общего количества 39 вертикальных  $\sigma$ -уровней 14 приходится на тропосферу. В стратосфере и мезосфере шаг по высоте составляет около 3 км. В горизонтальном направлении ХКМ охватывает весь земной шар с равномерными шагами по широте (4 градуса) и по долготе (5 градусов). В динамической части модели уравнения гидротермодинамики атмосферы, записанные в адвективной форме, решаются конечно-разностным методом с применением полунейвной схемы расчета [8].

Прогностическими переменными в модели общей циркуляции атмосферы кроме горизонтальных скоростей являются температура, удельная влажность и приземное давление. В радиационном блоке модели применяется метод Дельта-Эдингтона для расчета притоков тепла к атмосферным слоям [9]. Химическая часть модели учитывает изменчивость 74 основных газовых составляющих, прямо или косвенно влияющих на скорости нагрева атмосферы [10]. В модели учитываются реакции кислородного, водородного, азотного, хлорного, бромного и серного циклов, что позволяет рассматривать влияние химических процессов на образование и эволюцию как озона и влияющих на него газов, так и атмосферного сульфатного аэрозоля. Количество и тип учитываемых фотохимических реакций позволяет исследовать изменчивость основных влияющих на озон газов, как в стратосфере, так и в тропосфере и мезосфере [11].

Система уравнений переноса отношений смеси атмосферных газовых примесей с учетом фотохимического взаимодействия в совместной трехмерной модели решается для тридцати долгоживущих составляющих и пяти семейств (кислородного, азотного, хлорного, бромного и серного). Для газов, химическое время жизни которых существенно меньше характерного временного масштаба атмосферного переноса, в модели решается система жестких уравнений без учета их переноса атмосферной циркуляцией. Если для решения уравнений переноса долгоживущих примесей используется алгоритм динамической модели, то для жестких уравнений в химической части модели применяются самостоятельные, так называемые А-устойчивые методы

решения жестких систем, когда решения на явном и неявном шаге берутся с разными весовыми коэффициентами [12].

Алгоритм совместной модели составлен таким образом, чтобы учитывать взаимодействие между химическими и физическими процессами на каждом модельном шаге по времени. На первом этапе временного шага вычисляются потоки солнечной радиации по всей толще атмосферы в каждой географической точке для данного сезона и времени суток. При вычислении данных потоков учитывается текущее расчетное содержание озона в выше и ниже лежащих слоях атмосферы, а также рассеяние света молекулами и аэрозолем. Для расчета переноса излучения в атмосфере используется методика, основанная на применении модифицированной схемы Дельта-Эдингтона в коротковолновой части солнечного спектра [9].

Вычисленные радиационные потоки используются далее для расчета скоростей фотодиссоциации атмосферных газов, которые учитываются в химическом блоке модели для вычисления скоростей фотохимической продукции и разрушения рассчитываемых газов. При этом для оценки констант скоростей химических реакций используются вычисленные в динамическом блоке модели значения температуры атмосферы и константы химических реакций на основании данных JPL-2005 [13].

Значения скоростей фотохимической продукции вместе с вычисленными в динамическом блоке модели скоростями атмосферного переноса массы используются затем для моделирования эволюции радиационно- и химически активных долгоживущих атмосферных газов. Одновременно вычисляются концентрации короткоживущих путем решения уравнений химической кинетики без учета атмосферного переноса массы [14]. Шаги по времени в динамическом и химическом блоках модели синхронизируются (12 минут), в связи с чем при расчете концентраций химически активных газов автоматически учитывается суточный ход.

Рассчитанные таким образом концентрации озона используются далее для вычисления потоков солнечной радиации и уходящего длинноволнового излучения, которые учитываются в динамическом блоке модели для вычисления изменчивости температуры и скоростей ветра в нижней и средней атмосфере. Оцененные таким образом концентрации атмосферных газов, значения температуры и ветра иницируют следующий временной шаг совместной модели. В результате процесс взаимодействия химических и физических процессов переходит на следующий временной слой и моделирование временной и пространственной изменчивости содержания атмосферных газов и температуры продолжается в соответствии с описанными выше этапами.

Таким образом, взаимодействие между моделями осуществляется на каждом временном шаге путем использования рассчитанных в МОЦА скоростей ветра и температуры при моделировании переноса газовых примесей и скоростей химических реакций в МГС и, с другой стороны, путем использования рассчитанных в МГС значений содержания озона для оценки скоростей нагрева и выхолаживания атмосферы в МОЦА, влияющих на изменения температуры и ветра в атмосфере.

### **3. Результаты модельных экспериментов**

Модельные эксперименты с глобальной моделью выполнялись на период с 1979 по 2009, при этом переменные для этого периода нижние граничные условия потоков

химически активных газов задавались на основании сценариев Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [15], данные о температуре поверхности океана и площади покрытия льдом – по данным эксперимента АМИП [16], а значения площади поверхности атмосферного аэрозоля – по результатам спутникового эксперимента SAGE [17]. Переменные значения влияющих параметров позволили провести исследование влияния городских газовых выбросов на температуру атмосферы для различных уровней внешних характеристик.

На рис. 1 приведено процентное изменение атмосферного содержания нечетного азота в атмосфере, представляющего собой сумму концентраций всех химически активных азотных малых газовых составляющих, рассчитанное на модели при добавлении городских выбросов по сравнению с только фоновыми потоками. Сравнение с результатами аналогичных расчетов [18], полученных авторами без учета обратных связей между химией и динамикой, показывает, что максимальный эффект, превышающий двукратное увеличение окислов азота, в обоих вариантах наблюдается в пограничном слое атмосферы, т.е. непосредственно в местах выбросов.

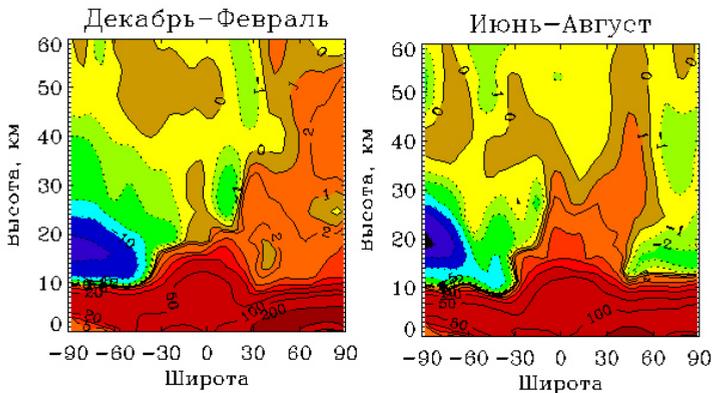


Рис. 1 – Процентное изменение концентрации нечетного азота при добавлении потоков газов в зонах интенсивного загрязнения

В стратосфере отмечается неоднородное широтное изменение концентрации окислов азота. При этом в Антарктическом регионе в нижней стратосфере отмечается уменьшение содержания нечетного азота, связанное, вероятно, с увеличением гравитационного осаждения полярных стратосферных облаков.

Максимальный эффект широтной неоднородности изменения концентрации окислов азота отмечается в полярных районах, с заметным уменьшением содержания окислов азота в период полярной ночи и развития весенней «озоновой аномалии» в Антарктиде в августе-ноябре. Подобное уменьшение содержания азотных составляющих, с одной стороны, может привести к уменьшению площади поверхности полярных стратосферных облаков, а с другой стороны, может увеличить эффект денитрификации полярной стратосферы, который является ключевым для формирования «озоновой дыры».

На рис. 2 приведено рассчитанное на модели соответствующее изменение концентрации озона. Добавление фактора переноса массы оказало максимальный эффект в нижней стратосфере, где в отличие от варианта без учета обратных связей, увеличение концентрации озона в тропических широтах отмечается в нижней стратосфере. В полярных же районах отмечается уменьшение концентрации озона в период развития весенней аномалии, что, с учетом увеличения содержания азотных составляющих, означает, что увеличение эффекта денитрификации оказывается более существенным для озоновой дыры, чем уменьшение площади поверхности полярных стратосферных облаков. Увеличение денитрификации, т.е. уменьшение содержания азотных составляющих в полярной стратосфере приводит к усилению разрушения озона в хлорных и бромных каталитических циклах, что приводит к уменьшению содержания озона в весенней Антарктической стратосфере, несмотря на уменьшение хлорной активации на уменьшившихся по площади из-за понижения концентрации паров азотной кислоты полярных стратосферных облаках.

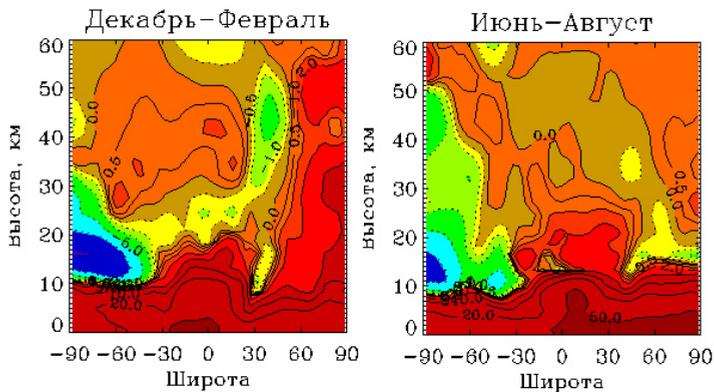


Рис. 2 – Процентное изменение концентрации озона при добавлении потоков газов в зонах интенсивного загрязнения

Изменение температуры атмосферы в результате всех процессов, сопутствующих добавлению городских выбросов окислов азота и других газов, показано на рис. 3. Максимальный эффект наблюдается в полярных районах, а особенно в Антарктическом регионе. При этом характерным является увеличение температуры полярной тропосферы и нижней стратосферы и охлаждение верхней стратосферы. Граница раздела между положительным и отрицательным изменением температуры меняется от 20 км Антарктическим летом (декабрь-февраль) до 50 км Антарктической зимой (июнь-август) и до 40 км Антарктической весной (сентябрь-ноябрь). Увеличение температуры максимально на высотах 20-25 км Антарктической весной и достигает 5 градусов. Максимальное охлаждение отмечается в этот же период, на тех же широтах и достигает 2 градусов. В нижней стратосфере охлаждение, которое в этот период превышает 0.5 градуса, наблюдается в тропических широтах.

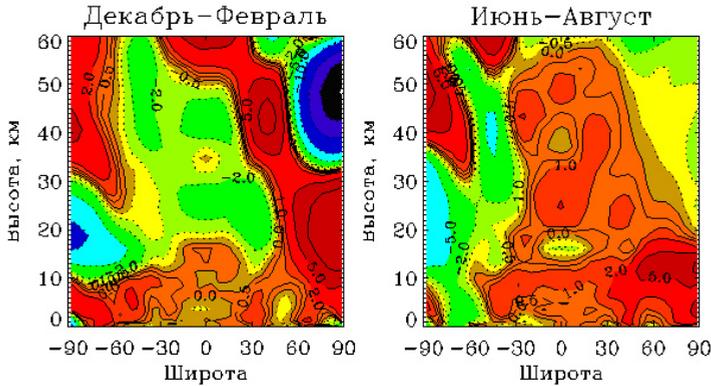


Рис. 3 – Изменение температуры атмосферы (градусы) при добавлении потоков газов в зонах интенсивного загрязнения

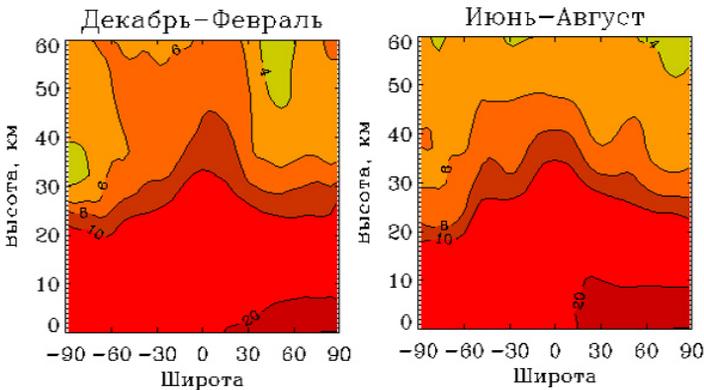


Рис. 4 – Изменение концентрации угарного газа CO (проценты) при добавлении потоков газов в зонах интенсивного загрязнения

На рис. 4 приведено расчетное изменение концентрации угарного газа при увеличении его выбросов с поверхности с добавлением маски зон интенсивного загрязнения.

Видно, что изменение концентрации CO, во-первых, является меньшим по величине по сравнению с окислами азота (рисунок 1), а во-вторых, является положительным и равномерным по всему земному шару. В стратосфере увеличение содержания угарного газа в 2-4 раза меньше, чем в тропосфере.

#### 4. Заключение

Проведены модельные расчеты чувствительности газового состава и температуры атмосферы к увеличению потоков химически активных газов в зонах интенсивных выбросов токсичных элементов. Результаты расчетов показали, что для окислов

азота максимальный эффект, превышающий двукратное увеличение окислов азота, в обоих вариантах наблюдается в пограничном слое атмосферы, т.е. непосредственно в местах выбросов.

Для атмосферного озона добавление фактора переноса массы оказало максимальный эффект в нижней стратосфере, где в отличие от варианта без учета обратных связей, увеличение концентрации озона в тропических широтах отмечается в нижней стратосфере. В полярных же районах отмечается уменьшение концентрации озона в период развития весенней аномалии.

Изменение температуры атмосферы в результате всех процессов, сопутствующих добавлению выбросов окислов азота и других газов в зонах с интенсивными источниками имеет максимальный эффект в полярных районах, а особенно в Антарктическом регионе. При этом характерным является увеличение температуры полярной тропосферы и нижней стратосферы и охлаждение верхней стратосферы. Изменение угарного газа незначительно по сравнению с влиянием окислов азота.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № П2190 от 09 ноября 2009 г.), мероприятие 1.3.1 по направлению «Геохимия».

### Литература

1. Ежегодный обзор «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2006 г.» / под ред. Э.Ю. Безуглая Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. – СПб.: ГГО Росгидромета, 2008.
2. Gery, M.W. A Photochemical Kinetics Mechanism for Urban and Regional Scale Computer Modeling / M.W. Gery, G.Z. Whitten, J.P. Killus, M.C. Dodge // J. Geophys. Res. – 1989. – № 94. – С. 925–956.
3. Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. – М.: изд-во МГУ, 1998. – С. 33.
4. Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М. Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 40, № 2. – С. 211.
5. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лыкосов В.Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. – М.: Препринт ИВМ РАН, 1998. – № 2086-В98. – С. 180.
6. Отчет Межправительственной группы экспертов по изменению климата // секретариат МГЭИК [Электронный ресурс]. – Электронный журнал. / МГЭИК.- Женева: МГЭИК, 2001. – режим доступа: <http://www.ipcc.ch>
7. Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН, ФАО, 2007. – Том 43, №4. – С. 437-452.
8. O.A.Søvde, M.Gauss, S.Smyshlyaev, I.S.A.Isaksen. Evaluation of the chemical transport model with focus on Arctic winter ozone depletion, J. Geophys. Res., 113, D09304, doi:10.1029/2007JD009240, 2008.
9. Dvortsov V.L., Zvenigorodsky S.G., Smyshlyaev S.P. On the use of isaksen-luther method of computing photodissociation rates in photochemical models // Journal of Geophysical Research. – 1992. – Т. 97, № D7. – С. 7593.
10. Smyshlyaev S. P., Dvortsov V. L., Geller M. A., Yudin V. A. A two dimensional model with input parameters from a GCM: Ozone sensitivity to different formulation for the longitudinal temperature variation // J. Geophysical. Research. – 1998. – V. 103. – P. 28373-28387.
11. Andersen S.B., Weatherhead E.C., Stevermer A. Comparison of recent modeled and observed trends in total column ozone//
12. Journal of Geophysical Research. – 2006. – Т. 111, № 2.
13. Penenko, V.V. Models and methods for environmental protection problems / V.V. Penenko, A.E. Aloyan. // Atmos. Oceanic Opt.. – 1985. – № 3. – С. 256.

14. *DeMore W.B., Sander S.P., Golden D.M.* Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling. JPL Publ., 05-4, 27 pp., 2006.
15. *Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyaev S.P.* Parametrization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations // Journal of Geophysical Research. – 1998. – Т. 103, № D17. – С. 22047-22062.
16. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. WMO, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 47, Geneva, Switzerland, 2005.
17. *Frei, A., J. A. Miller, Robinson D.A.* Improved simulations of snow extent in the second phase of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-2) // J. Geophys. Res. – 2003.V.108. – P. 4369.
18. *Thomason L.W., Poole L.R., Deshler T.* A global climatology of stratospheric aerosol surface area density deduced from Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II measurements: 1984–1994 // J. Geophys. Res. – 1997. – V.102. – P. 8967–8976.
19. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 40, № 2. – С. 211.

*А.П.Филиппенко, С.П.Смышляев, П.А.Блаkitная, А.Р.Курганский,  
С.В.Мостаманди*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СУТОЧНОГО ХОДА ХИМИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ  
СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ В ЗОНАХ ИНТЕНСИВНЫХ ВЫБРОСОВ  
ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ**

*A.P. Filippenko, S.P. Smyshlyayev, P.A. Blakitnaya, A.R. Kurgansky, S.V. Mostamandi*

**MODELING OF CHEMICAL COMPOSITION DIURNAL VARIATIONS IN THE  
REGIONS WITH INTENSE POLLUTANT EMISSIONS**

*Боксовая фотохимическая модель приземного слоя атмосферы используется для исследования суточной изменчивости химически активных атмосферных газов в загрязненных и фоновых районах. Исследуется зависимость концентраций приземных газов и их суточного хода от температуры атмосферы и интенсивности поверхностных выбросов в зонах с интенсивными токсичными загрязнениями. Результаты расчетов показывают, что при уменьшении температуры содержание приземного озона увеличивается в загрязненных зонах, а в фоновых районах практически не меняется.*

*Ключевые слова: токсичные газы, атмосфера, атмосферные химические реакции, суточный ход*

*Box photochemical model of the atmospheric boundary layer is used to study diurnal variability of the chemically active atmospheric gases both in the regions with intensive pollution emissions and background conditions. Temperature variability impact on the alues and diurnal variability of the chemical gases is studied for during winter and summer season. Model results demonstrate that low temperature conditions cause ozone enhanced concentrations both for winter and summer seasons in the regions with intensive pollutant emissions and almost negligible effect for background regions.*

*Key words: toxic gases, atmosphere, atmospheric chemical reactions, diurnal cycle*

В последнее время в мире отмечается тенденция увеличения выбросов химически активных газов в атмосферу, особенно в зонах с интенсивными источниками токсичных загрязнений [1]. При этом увеличивается как качественный состав, т.е. количество выбрасываемых в атмосферу газов, так и интенсивность их выбросов [2]. В таких условиях экологически важным становится не только химический состав выбрасываемых в приземный слой атмосферы газов в зонах с интенсивными источниками токсичных загрязнений, но и их способность к химической трансформации в зонах выбросов и подверженности к трансграничному переносу, т.е. их перемещения атмосферными потоками в другие регионы, не содержащие источников токсичных загрязнений [3].

Для репрезентативной оценки способности токсичных газов к локальной трансформации и трансграничному переносу необходимо создавать химико-динамические модели [4], ориентированные на зоны с интенсивными источниками токсичных загрязнений. В подобных зонах химический состав выбрасываемых в приземный слой атмосферы газов существенно отличается от химического состава газов в фоновых рай-

онах, не содержащих источников токсичных выбросов [5]. В результате этого химические реакции в приземном слое атмосферы в зонах с интенсивными источниками токсичных загрязнений протекают по другому, по сравнению с фоновыми районами, на которые ориентированы существующие модели химического состава атмосферы [6].

Для исследования влияния токсичных выбросов в атмосферу загрязненных районов на состав атмосферы, погоду и климат в глобальном масштабе проводились численные модельные эксперименты, в которых сначала не учитывалось влияние токсичных выбросов, т.е. рассматривались только фоновые потоки химически активных газов, а затем добавлялась маска зон с дополнительными потоками газов в атмосферу. Кроме того, были проведены эксперименты регионального масштаба для мегаполиса Санкт-Петербург с отдельными выбросами окислов азота, угарного газа и углеводородов, для того, чтобы оценить относительную роль каждого из этих газов в формировании региональной изменчивости состава и структуры атмосферы.

Эксперименты проводились с использованием боксовой химической модели [7] для регионов, находящихся под влиянием интенсивных токсичных выбросов. Методика экспериментов заключалась в изменении граничных условий для загрязненных регионов по сравнению с фоновыми сельскими районами, а также вариациях температуры в зимний и летний периоды.

Условия загрязненных регионов задавались в качестве увеличения выбросов газов, имеющих повышенные выбросы в подобных районах. В таблице 1 представлены начальные условия модели в соотношении с фоновыми концентрациями на основании данных наземных измерений экспериментов TROICA [8].

В результате были получены тенденции изменения содержания озона, окислов азота, гидроксильного радикала и угарного газа в тропосфере в течение суток.

На рисунке 1 прослеживается ярко выраженный суточный ход озона в летний период (а) и зимний период (б).

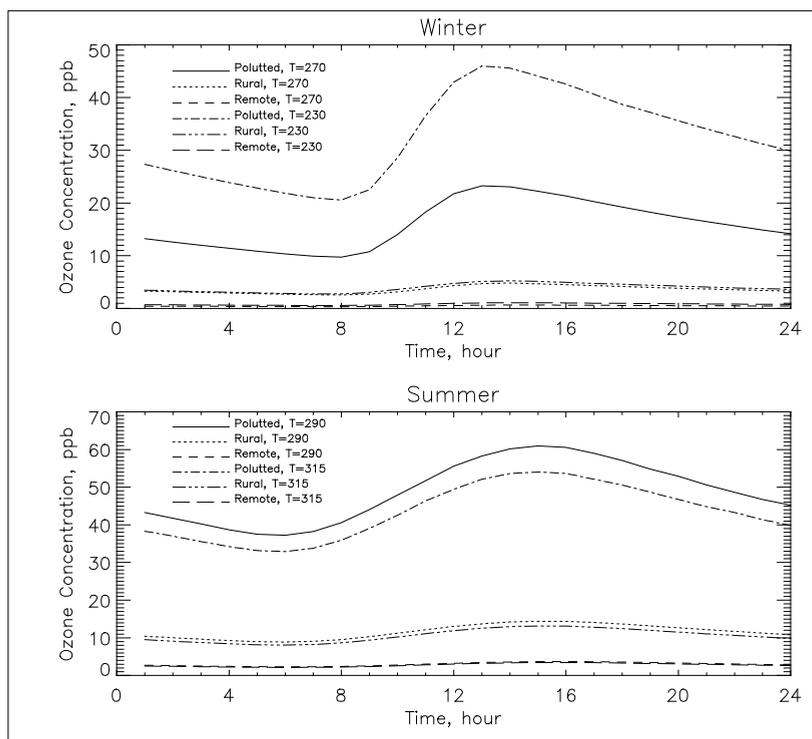
Таблица 1

Соотношение начальных условий для нижних слоев загрязненных зон и сельских районов в боксовой модели

Газ	Загрязненные концентрации (ppb)	Концентрации сельских районов (ppb)
CO	4000	1250
CH <sub>4</sub>	2400	160
SO <sub>2</sub>	20	0.25
O <sub>3</sub>	80	65
NO <sub>x</sub>	100	0.2
NO	900	0.008
NO <sub>2</sub>	800	0.045
NO <sub>3</sub>	0.4	0.00009
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15	0.002
HNO <sub>3</sub>	50	0.17
ПАН	50	5

Причем, с увеличением температуры в загрязненных районах суточный ход становится более резким с понижением концентрации озона в дневное время. При повышении фоновых концентраций озона при неизменно высокой температуре, рассмотренной как экстремальный случай, не наблюдается значительного изменения концентрации. Однако, в случае сельской местности содержание озона меняется крайне незначительно, без видимого суточного хода, и не зависит от повышения или понижения температуры.

(а)



(б)

Рис. 1 – Изменение содержания тропосферного озона в условиях мегаполисов и вне городов в летний и зимний периоды

В зимний период наблюдается суточный ход с медленным ростом содержания озона в условиях мегаполиса при стандартных температурах, однако, при сильном понижении температуры наблюдается уменьшение содержания озона. В сельской местности, напротив, наблюдается медленный рост концентрации с незначительным повышением при падении температуры до  $-25\text{ C}$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что вариации температуры незначительно влияют на изменение концентрации озона в региональном масштабе, в отличие от повышенных концентраций городских выбросов, которые напрямую воздействуют на ход химических реакций в условиях промышленного города.

Данный эффект также хорошо прослеживается на примере окиси азота. В летний период (см. рисунок 2 – а) концентрация в городе в среднем составляет  $10^{13}$  молекул/см<sup>3</sup>, тогда как в сельской местности падает до  $10^{10}$  молекул/см<sup>3</sup> в ночные часы, с медленным понижением в течение 3 суток.

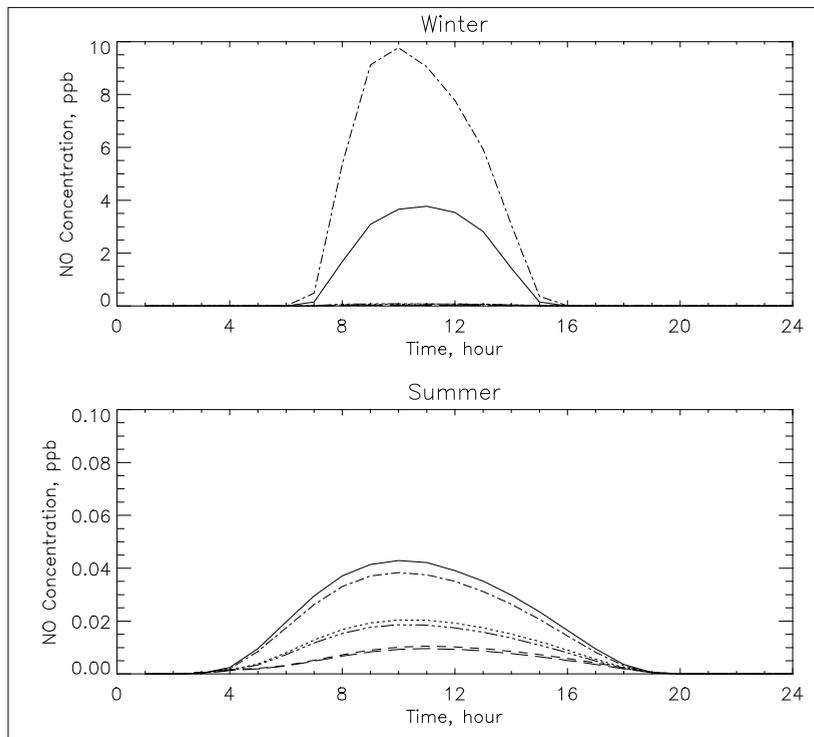


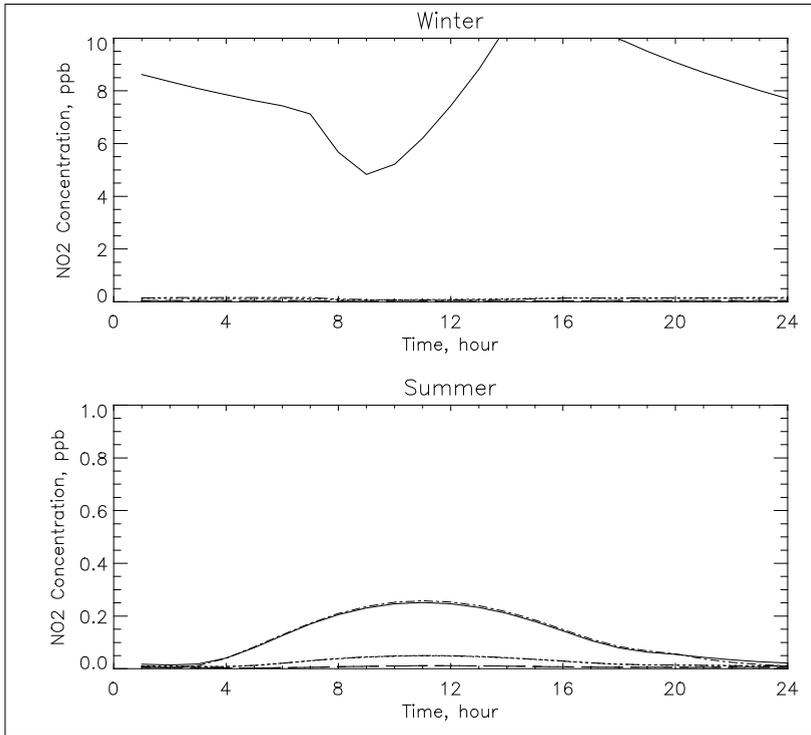
Рис. 2 – Изменение содержания оксида азота в условиях мегаполисов и вне городов в летний и зимний периоды

В зимнее время (см. рис. 2 – б) суточный ход концентрации окиси азота в мегаполисах повторяет суточный ход в сельских районах с различием концентраций на 5 порядков.

На рис. 3 (а) представлено изменение концентрации оксида азота в мегаполисе, где происходит медленное накопление газа летом и понижение концентрации при экстремальных значениях температур до  $10^{12}$  молекул/см<sup>3</sup>. В сельских районах происходит понижение концентрации, особенно при условии высоких значениях температуры. Похожая ситуация наблюдается в зимнее время, однако значения концентраций выше и понижение концентрации в сельских районах менее резкое, чем летом.

Безусловно, антропогенная активность влияет на выбросы окислов азота, но изучать данное влияние целесообразно в региональном масштабе, т.к. время жизни NO довольно мало.

(a)



(б)

Рис. 3 – Изменение содержания оксида азота (II) в условиях мегаполисов и вне городов в летний и зимний периоды

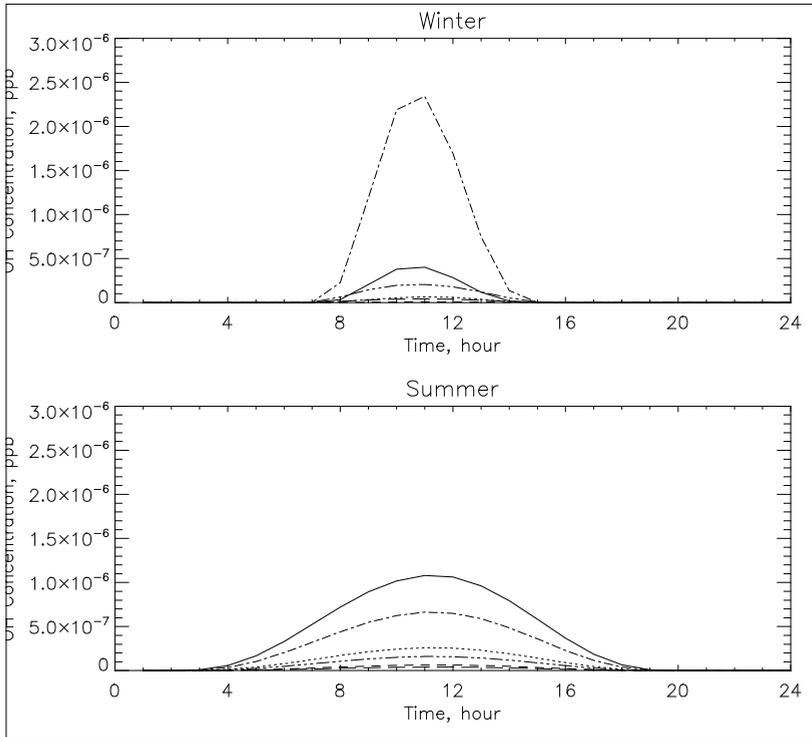
Содержание гидроксильного радикала OH определяет окислительную способность всей тропосферы. На рис. 4 (а) представлено содержание OH в тропосфере города и в сельских районах летом.

В загрязненных регионах, таких как промышленные города, фоновые концентрации примесей в пограничном слое атмосферы выше по сравнению с сельскими районами, следовательно, времена жизни газов сокращаются ввиду повышенной химической активности.

В зимний период года время жизни газов увеличивается как следствие понижения температуры, что препятствует активным фотохимическим процессам, увеличивается интенсивность выбросов аэрозолей и продуктов сгорания, а пограничный слой атмосферы городов, а также увеличиваются антропогенные потоки тепла ввиду усиленного отопления зданий. Все это приводит к увеличению устойчивости пограничного слоя и накоплению газов.

Так как угарный газ является источником его концентрация не зависит от сезона года при неизменных показателях выбросов с поверхности.

(a)



(б)

Рис. 4 – Изменение содержания гидроксильного радикала в условиях мегаполисов и вне городов в летний (а) и зимний (б) периоды

Также, было проведено несколько экспериментов при концентрациях угарного газа и оксида серы, превышающих ПДК в воздухе. При этом, наблюдался сильный рост содержания озона в атмосфере города. Таким образом, в присутствии азотных радикалов имеющие токсичные свойства метан и угарный газ существенно ухудшают токсикологическую обстановку в атмосфере за счет продукции значительного количества молекул озона.

Эксперименты показали:

- а) токсичными по своим свойствам газами поверхностного происхождения являются угарный газ, метан, углеводороды неметановой группы (этаны, бутаны, ацетоны и др.) пары кислот (соляной, серной, фторовой и др.) сернистые газы (сероводород, двуокись серы) и окислы азота;
- б) формирование токсичного у земной поверхности озона происходит при участии углеводородов и окислов азота, при этом при окислении одной молекулы углеводорода может образовываться до пяти молекул озона;
- в) Разрушение токсичных газов может происходить в результате реакций с окислами азота и водорода, при этом помимо непосредственного разрушения токсичных газов может происходить и прерывание цепочек образования токсичного озона.

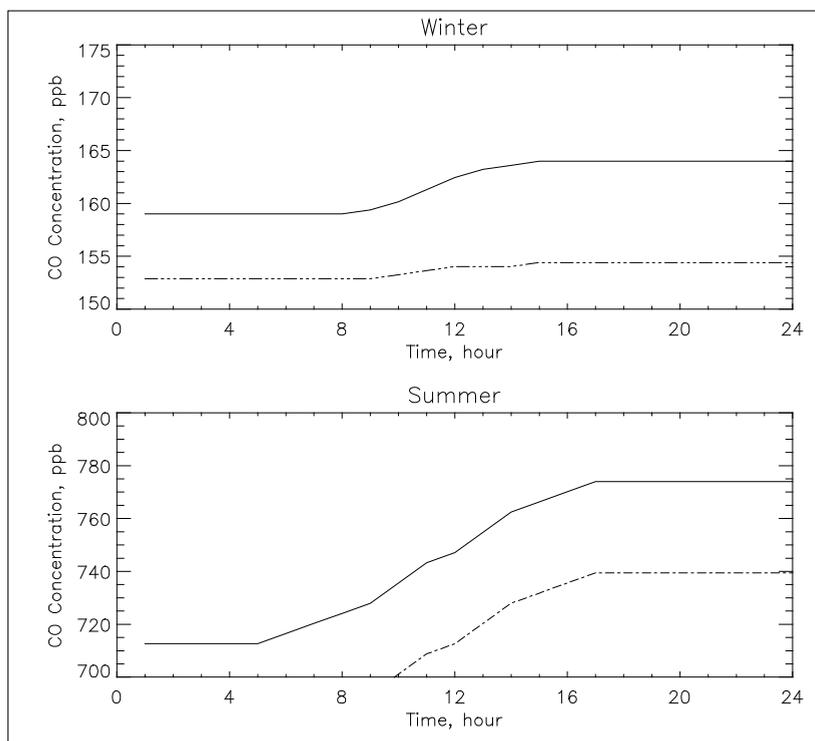


Рис. 5 – Изменение содержания угарного газа в условиях мегаполисов и вне городов

### **Заключение**

Боксовая фотохимическая модель приземного слоя атмосферы используется для исследования суточной изменчивости химически активных атмосферных газов в загрязненных и фоновых районах. Исследуется зависимость концентраций приземных газов и их суточного хода от температуры атмосферы и интенсивности поверхностных выбросов в зонах с интенсивными токсичными загрязнениями. Результаты расчетов показывают, что при уменьшении температуры содержание приземного озона увеличивается в загрязненных зонах, а в фоновых районах практически не меняется.

Проведенные исследования позволили изучить механизмы, взаимосвязей химических процессов, химические режимы в атмосфере, выявить закономерности обратных связей температурного режима атмосферы в приземном слое атмосферы загрязненных зон на основе методов математического моделирования с учетом специфики климатических, ландшафтных и других условий исследуемого региона.

Реализация данного подхода позволила осуществить комплексный анализ состояния атмосферы загрязненных регионов, включая контроль за текущим состоянием качества воздуха в конкретных регионах и в конкретные сезоны года. Также

была протестирована методология химического прогноза погоды для мегаполисов РФ и методология использования в оперативной практике составления прогноза погоды, особенно в условиях аномальных температурных отклонений.

Исследования показали, что в региональном масштабе на химическую трансформацию влияет не столько температура, сколько выбросы с поверхности крупных городов и мегаполисов. Концентрации  $\text{NO}_x$  растут, либо неизменно высоки в городах, но понижаются в сельских регионах. Концентрации озона не меняются в сельских районах летом, растут зимой, в городах — понижаются впадением температуры, растут с повышением температуры летом.

При экстремальных значениях температур летом концентрации малых газов понижаются, сокращается время жизни, однако концентрации долгоживущих газов практически не меняются, ввиду продолжительного времени жизни. При экстремальных значениях температур зимой концентрация озона увеличивается,  $\text{NO}_x$  падает. В сельских районах значительно не меняется.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П2190 от 09 ноября 2009 г.), мероприятие 1.3.1 по направлению «Геохимия».

### Литература

1. Электронная база данных SEDAC Центр социоэкономических данных // SEDAC [Электронный ресурс]. — Электронная база данных. / Университет Колумбии . — Нью-Йорк: Университет Колумбии, 2005. — <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/>.
2. Курбатова, А.С. Экология города [Текст]/ А.С. Курбатова, Башкин В.Н. — М.: Научный мир, 2004. — С 624.
3. Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyaev S.P. Paraneitization of the convective transport in a two-dimensional chemistry transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations // Journal of Geophysical Research. — 1998. — Т. 103, № D17. — С. 22047–22062.
4. Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М. Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2004. — Т. 40, № 2. — С. 211.
5. Гаврилова, Ю.В. Модельное исследование влияния крупных городов на региональные аспекты погоды / Ю.В. Гаврилова, С.П. Смышляев, А.Г. Махура // Ученые записки РГГМУ. Научно-теоретический журнал. — 2010. — № 15. — С. 107 – 112.
6. Brasseur G. Atmospheric Chemistry and Global Change / G Brasseur, J. Orlando, G. Tyndall, Oxford University Press, 1999.
7. Филиппенко А.П., Смышляев С.П., Блакитная П.А. Химические механизмы трансформации токсичных газов в атмосфере // Ученые записки РГГМУ — 2010. — № 15. — С. 41–53.
8. Panin, L.V. Estimation of Reliability of the Data on Pollutant Content Measured in the Atmospheric Surface Layer in the TROICA Experiments / L.V. Panin, N.F. Elansky, I.B. Belikov, I.G. Granberg, A.V. Andronova, Yu.I. Obvintsev, V.M. Bogdanov, Grisenko, A.M., V.S. Mozgrin // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2001.- Vol. 37, Suppl. 1, — С. 375–396.
9. Смышляев, С.П. Моделирование влияния изменений спектральных потоков солнечной радиации, вызванных солнечной активностью, на содержание атмосферного озона / С.П. Смышляев, В.Я. Галин, П.А. Зименко, А.П. Кудрявцев // Метеорология и гидрология. — 2005. — № 8.— С. 25 – 37.

*А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая*

**ОБРАЩЕНИЕ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ**

*A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Y.B. Rzhonsnitskaya*

**WEAK BACKSCATTERING SIGNALS INVERTING**

*рассматривается метод интерпретации сигналов обратного рассеяния аэрозолям атмосферы. Выполняется анализ точностных характеристик данных лидарного зондирования. Более эффективной по сравнению с симметричной схемой оказывается несимметричная схема обработки данных.*

*Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, лидарное зондирование, коэффициент ослабления, лидарное уравнение, случайные погрешности.*

*It is considered the method of weak backscattering signals interpretation. There is carried out the error analyses of lidar probing date. The asymmetric date processing scheme is more effective then the symmetric scheme.*

*Key words: atmospheric aerosols, lidar probing, extinction coefficient, lidar equation, statistical errors.*

В работе рассматривается метод интерпретации данных лидарного зондирования слабо рассеивающей атмосферы. Сложность обратной задачи лазерного дистанционного зондирования слабо рассеивающей атмосферы обусловлена существенной ролью погрешностей измерений, включая погрешности из-за фоновой засветки [1]. В линейном приближении исследуются случайные погрешности коэффициента ослабления атмосферного аэрозоля.

**Интегральный метод интерпретации данных измерений лидарными системами различной позиционности**

Для малой длительности зондирующих импульсов интерпретация слабых лидарных сигналов основана на обращении уравнения:

$$P(\vec{R}_j, \vec{r}_j) = P_* + Af\beta(\vec{r}_j) \exp\left(-2 \int_{c_{i,j}} \sigma(\vec{r}) dr\right), \quad (1)$$

где  $P_*$  – фоновая засветка,  $A$  – постоянная лидара,  $f$  – геометрический фактор лидара,  $\beta$  – коэффициент обратного рассеяния,  $\sigma$  – коэффициент ослабления,  $\vec{r}_j$  – радиус-вектор зондируемого рассеивающего объема,  $\vec{R}_j$  – радиус-вектор точки посылки зондирующих импульсов и приема сигналов обратного рассеяния,  $c_{i,j}$  – отрезок  $[\vec{R}_j, \vec{r}_j]$ , вдоль которого вычисляется интеграл в уравнении (1).

В работе [2] найдено решение этой задачи относительно коэффициента ослабления, содержащее процедуру исключения постоянной составляющей мощности, принимаемой лидаром.

В случае однородной атмосферы лидарное уравнение (1) можно записать в виде:

$$P_i = P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i), \quad (2)$$

где  $B = A\beta$ .

Уравнение (2), записанное для двух дополнительных зондируемых элементов ( $j$  –го,  $k$  –го), дает возможность сформулировать два дополнительных равенства, в результате получается система из трех уравнений относительно неизвестных величин  $P_*$ ,  $B$ ,  $\sigma$ .

Исключение неизвестных  $P_*$ ,  $B$  из этой системы приводит к уравнению для величины  $\sigma$  в общем случае несимметричной схемы обработки данных зондирования.

Случайная погрешность, с которой эта характеристика определяется, может быть найдена в линейном приближении. В этом приближении получается выражение:

$$\delta = C_* \left\{ \left( \frac{\partial \sigma}{\partial P_i} \right)^2 P_i + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial P_j} \right)^2 P_j + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial P_k} \right)^2 P_k \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

где производные вычисляются следующим образом:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P_i} = \{ R_j^{-2} \exp(-2\sigma R_j) - R_k^{-2} \exp(-2\sigma R_k) \} / Q_{ijk}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P_j} = \{ R_k^{-2} \exp(-2\sigma R_k) - R_i^{-2} \exp(-2\sigma R_i) \} / Q_{ijk}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P_k} = \{ R_i^{-2} \exp(-2\sigma R_i) - R_j^{-2} \exp(-2\sigma R_j) \} / Q_{ijk}, \quad (6)$$

где

$$Q_{ijk} = 2 \left\{ \frac{P_k - P_j}{R_i} \exp(-2\sigma R_i) + \frac{P_i - P_k}{R_j} \exp(-2\sigma R_j) - \frac{P_j - P_i}{R_k} \exp(-2\sigma R_k) \right\}.$$

Аналогичное решение получается для величины  $P_*$ .

Величина  $\delta/P_*$  не превышает нескольких процентов 10%. Вместе с тем, величина  $\delta/\sigma$  оказывается значительно большей.

Результаты теоретического анализа случайной погрешности коэффициента ослабления показывают для симметричной схемы наличие минимального значения величины  $\delta = \delta_{\min}$ , зависящего от условий зондирования и равного, приблизительно,  $C_*(A\beta)^{-1/2}$ . Действительно, для этой схемы оценка (3) переписывается в виде

$$\delta = C_* \left\{ \left( \frac{\partial \sigma}{\partial P_i} \right)^2 P_i + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial P_{i+m}} \right)^2 P_{i+m} + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial P_{i+2m}} \right)^2 P_{i+2m} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

и можно получить соотношения:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P_i} = R_i^2 \exp(2\sigma R_i) \{ R_{i+2m}^2 \exp(2\sigma m\Delta) - R_{i+m}^2 \} / 2A\beta D_{im} m\Delta, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P_{i+m}} = R_{i+m}^2 \exp(2\sigma R_{i+m}) \{R_i^2 - R_{i+2m}^2 \exp(4\sigma m\Delta)\} / 2A\beta D_{im} m\Delta, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P_{i+2m}} = R_{i+2m}^2 \exp(2\sigma R_{i+2m}) \{R_{i+m}^2 \exp(2\sigma m\Delta) - R_i^2\} / 2A\beta D_{im} m\Delta, \quad (10)$$

где

$$m\Delta = R_{i+2m} - R_{i+m} = R_{i+m} - R_i, \quad (11)$$

$$D_{im} = R_{i+2m}^2 \exp(4\sigma m\Delta) - 2R_{i+m}^2 \exp(2\sigma m\Delta) + R_i^2. \quad (12)$$

Следует отметить, что величина  $P_*$  входит лишь в соотношение (7). Очевидно, что ее увеличение вызывает рост погрешности коэффициента ослабления, поэтому минимум погрешности достигается при отсутствии фоновой засветки, что учитывается в данном анализе. С уменьшением дальности зондирования погрешность величины  $\sigma$  уменьшается, т.к. увеличивается эхо сигнал. Это уменьшение можно обосновать, рассмотрев равенства, сформулированные для оценки погрешности. Величина  $R_i$  входит в отношения выражений в фигурных скобках в равенствах (8) - (10) к величине  $D_{im}$ . Кроме того, она содержится в равенстве (7), т.к. от нее зависит мощность эхо сигнала, которая дополнительно входит и в равенства (8) - (10), однако эта составляющая рассматриваемого уменьшения очевидна. Величина упомянутых отношений не может быть меньше по модулю их значений при подстановке в них значения  $R_i = 0$ . В этом можно убедиться, учитывая, что величины  $D_{im}$  и

$$E_{im} = R_i^2 \{3\exp(4\sigma m\Delta) - 4\exp(2\sigma m\Delta) + 1\} \quad (13)$$

являются неотрицательными.

Принимая во внимание изложенное, и обратив внимание на то, что первое слагаемое в формуле (7) равно нулю при выполнении равенства  $R_i = 0$  эту формулу можно записать в виде:

$$\delta = C_* \exp(2\sigma m\Delta) \{4\exp(2\sigma m\Delta) + 1\}^{1/2} / 2 \{2\exp(2\sigma m\Delta) - 1\} \sqrt{A\beta}. \quad (14)$$

Минимальное значение погрешности

$$\delta_{\min} = C_* (5 + \sqrt{13}) \sqrt{4 + \sqrt{13}} / 24 \sqrt{A\beta} \quad (15)$$

достигается при

$$m\Delta = \frac{1}{2\sigma} \ln \frac{3 + \sqrt{13}}{4}. \quad (16)$$

Следует отметить, что с точностью до второго знака

$$\delta_{\min} = C_* / \sqrt{A\beta}. \quad (17)$$

Таким образом, погрешность  $\delta/\delta_{\min}$  может как уменьшаться, так и увеличиваться при увеличении шага зондирования  $\Delta r$  (рис 1). Данный факт объясняется усилением при этом затухания эхо-сигнала, с одной стороны, и увеличением погрешности мощности сигнала, с другой стороны. Путем выбора шага зондирования  $\Delta r$  можно существенно (в несколько раз) уменьшить погрешность определения коэффициента ослабления методом лидарного зондирования.

Случайная погрешность  $\delta$  коэффициента ослабления для несимметричной схемы обработки данных (два шага дифференцирования  $\Delta r$  – ближний к лидару шаг,  $\Delta R$  – дальний от лидара шаг) может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы. Для сравнения на рис. 1г, 2 представлены результаты расчетов относительной погрешности  $\delta/\sigma$  для этих двух типов схем обработки.

Расчеты выполнены для  $E = P_*/A\beta = 0.5 \text{ км}^{-2}$ ,  $\delta_{\min} = 0,003 \text{ км}^{-1}$  для двух одинаковых шагов зондирования  $\Delta r$  (рис. 1) и для шагов зондирования  $\Delta r = 1 \text{ км}$ ,  $\Delta R$  (рис. 2).

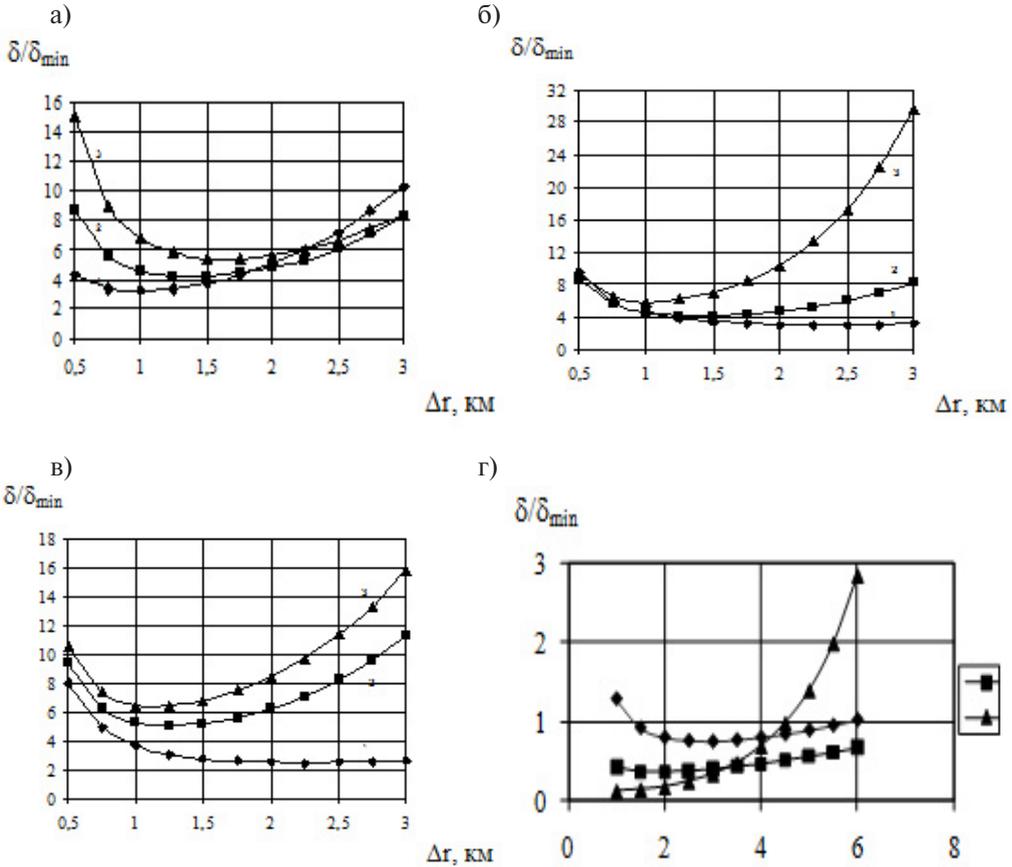


Рис. 1 – Зависимость величины относительной погрешности  $\delta/\sigma$  от переменных  $\Delta r$ ,  $r$ ,  $\sigma$  для симметричной схемы обработки данных

- а)  $P_*/P(1) = 0.05$ ,  $\sigma = 0,3 \text{ км}^{-1}$   
 1 –  $r = 0,5 \text{ км}$ , 2 –  $r = 1,0 \text{ км}$ ; 3 –  $r = 1,5 \text{ км}$
- б)  $P_*/P = 0.05$ ,  $r = 1,0 \text{ км}$   
 1 –  $\sigma = 0,1 \text{ км}^{-1}$ , 2 –  $\sigma = 0,3 \text{ км}^{-1}$ , 3 –  $\sigma = 0,5 \text{ км}^{-1}$
- в)  $\sigma = 0,3 \text{ км}^{-1}$ ,  $r = 1,0 \text{ км}$   
 1 –  $P_*/P = 0$ ; 2 –  $P_*/P = 0,1$ ; 3 –  $P_*/P = 0,2$

- г) 1 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>; 2 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,3$  км<sup>-1</sup>;  
3 –  $r = 2,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>

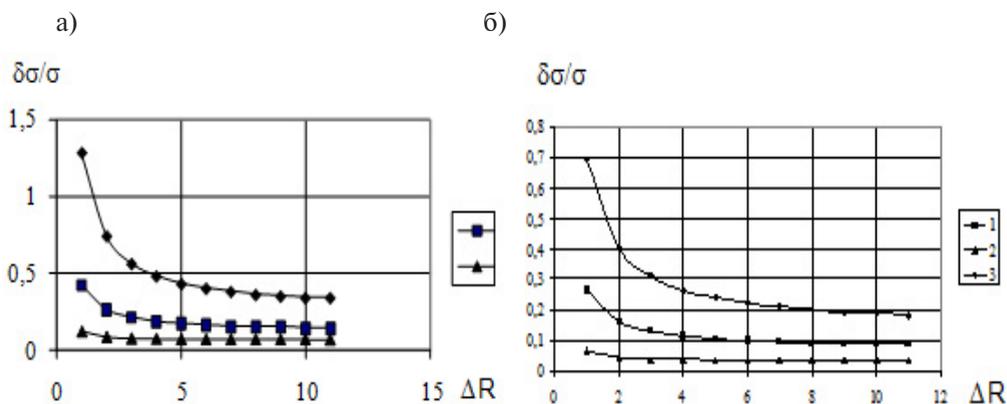


Рис. 2 – Зависимость величины относительной погрешности  $\delta/\sigma$  от переменных  $\Delta r$ ,  $\Delta R$ ,  $r$ ,  $\sigma$  для несимметричной схемы обработки данных

- а) 1 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>;  $E = 0.5$  км<sup>-2</sup>  
2 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,3$  км<sup>-1</sup>;  
3 –  $r = 2,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>  
б) 1 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>;  $E = 0.1$  км<sup>-2</sup>  
2 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,3$  км<sup>-1</sup>;  
3 –  $r = 2,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>

### **Заключение**

В работе исследованы точностные характеристики методов интерпретации данных лидарного зондирования слабо рассеивающей атмосферы. Показано, что погрешность коэффициента ослабления для симметричной схемы обработки данных может как уменьшаться, так и увеличиваться при увеличении шага зондирования. Более эффективной по сравнению с симметричной схемой оказывается несимметричная схема обработки данных.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П781 от 24 мая 2010 г) по направлению «Физика атмосферы»

### **Литература**

1. Yegorov A.D. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem [Text] / A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Yu.B. Rzhonsnitskaya // International Journal of Remote Sensing, 2008, v.29, 2449 – 2468.
2. Егоров А.Д., Поталова И.А. Определение характеристик аэрозоля лидарными системами // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2002, вып.4(552), с.14 - 18.

*С.П. Смышляев, В.Я. Галин, М.А. Моцаков, Т.В. Суходолов, Е.И. Хорева*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЯ НА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

*S.P. Smyshlyayev, V.Ya. Galin, M.A. Motsakov, T.V. Sukhodolov, E.I. Horeva*

## A MODEL STUDY OF THE AEROSOL PARTICLES IMPACT ON THE ATMOSPHERIC TEMPERATURE AND COMPOSITION CHANGES

*Химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы используется для исследования влияния аэрозоля на радиационный режим и газовый состав тропосферы и стратосферы. Анализируются результаты модельных экспериментов, в которых содержание аэрозоля в атмосфере задается из спутниковых измерений. Сравняется влияние изменчивости содержания аэрозоля на температуру и химический состав в нижней и средней атмосфере.*

*Ключевые слова: аэрозоль, солнечная радиация, гетерогенные химические реакции, температура, газовый состав*

*A chemistry-climate model of the low and middle atmosphere is used to study aerosol impact on the radiative balance and chemical composition of the troposphere and stratosphere. The model runs results with specified aerosol particles surface area from satellite observations are analyzed. Aerosol variability impact on the temperature and chemical composition of the low and middle atmosphere is compared.*

*Keywords: aerosol, solar radiation, heterogeneous chemical reactions, temperature, gaseous composition*

Точное и исчерпывающее описание взаимодействия между атмосферой Земли и солнечной радиацией является ключевой задачей для прогноза изменений погоды, глобального и регионального климата и состава атмосферы [1]. Атмосферные аэрозоли и облачность это наиболее изменчивые, наименее изученные и наиболее важные факторы, влияющие на радиационный режим атмосферы [2].

В последнее время появились идеи искусственной компенсации глобального потепления путем выброса в стратосферу большого количества аэрозольных частиц, которые должны ослаблять приток солнечной энергии к земной поверхности [3]. В данных предложениях учитывается лишь один аспект влияния аэрозоля на процессы в атмосфере. Между тем, подобное возмущение стратосферы может вызвать, во-первых, нагрев стратосферы, во-вторых, изменение ее газового состава, в-третьих, изменение циркуляции стратосферы и, в-четвертых, возникновение обратных связей между процессами в стратосфере и тропосфере и между изменениями состава и структуры атмосферы [4].

Для анализа последствий этих явлений в последнее время стали проводиться исследования с использованием различных моделей атмосферных процессов. Однако в настоящей работе подобное исследование с использованием химико-

климатической модели нижней и средней атмосферы впервые соотносится с аналогичным, по сути, явлением вулканических выбросов аэрозоля в стратосферу и дополняется анализом измерений.

Вулканические выбросы издавна считаются источником возможного воздействия на погоду и климат [5]. Еще 2000 лет назад Плутарх отмечал, что крупный выброс вулкана Этна в 44 году до нашей эры привел к сильному похолоданию, неурожаяю и голоду в Риме и Египте. В дальнейшем Б.Франклин выдвигал предположение, что извержение вулкана Лакагигар в Исландии в 1783 году могло быть причиной ненормально холодного лета в Европе в 1783 году и экстремально холодной зимы 1783-1784 годов. Уже в XX веке эффекты похолодания после вулканических выбросов были ассоциированы с радиационными эффектами, связанными со стратосферным аэрозолем вулканического происхождения. Количественные оценки влияния вулканических выбросов на погоду и климат через изменение содержания стратосферного аэрозоля стали появляться во второй половине XX века.

В последние десятилетия постоянно происходили извержения вулканов различной мощности, которые являлись предметом исследования с точки зрения их влияния на климат. Наиболее существенными среди них являлись извержения вулканов Эль Чичон в 1982 году и Пинатубо в 1991 году. Между тем, эти исследования главным образом концентрировались на изучение влияния вулканических выбросов на охлаждении нижней части тропосферы, т.е. области жизни биологических организмов. Между тем, было обнаружено, что вулканические выбросы не только охлаждают тропосферу, но и нагревают стратосферу. Таким образом, может меняться не только радиационный баланс тропосферы, но и радиационный баланс стратосферы и вертикальные градиенты температуры, приводящие к изменению циркуляции как в стратосфере, так и в тропосфере.

В настоящей работе, впервые проведено комплексное исследование всех аспектов влияния вулканических выбросов аэрозоля на изменения температуры и циркуляции как в тропосфере, так и в стратосфере. Для этих целей используется химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы [6,7], в которой содержание аэрозоля задается по данным спутниковых измерений в течение 1979-2003 годов.

После извержения вулкана Агунг в 1963 году впервые было отмечено влияние вулканических выбросов аэрозоля не только на климат, но и на газовый состав атмосферы и, прежде всего, на сокращение содержания озона. Влияние извержений вулканов Эль Чичон и Пинатубо на содержание озона и других атмосферных газов уже анализировались с помощью моделей газового состава стратосферы. Было отмечено, что вулканические выбросы сульфатного аэрозоля в масштабах подобных Эль Чичону и Пинатубо имеют глобальное воздействие на содержание озона, а их эффект по порядку величины сравним, или даже превосходит другие естественные природные и антропогенные факторы влияния на глобальный озон. Изменение содержания озона, водяного пара и других радиационно-активных газов в результате вулканических выбросов может в свою очередь привести к изменению нагрева атмосферы и, соответственно, ее температуры и циркуляции.

В настоящей работе впервые одновременно исследуются как радиационные эффекты вулканических выбросов, так и их влияние на содержание атмосферных газов и обратные связи между этими эффектами.

Для исследования влияния вулканических выбросов сульфатного аэрозоля на состав и структуру атмосферы использовались данные об изменении оптической толщины атмосферы по данным спутниковых измерений SAGE-1 и SAGE-II. На рис. 1 приведена межгодовая изменчивость содержания аэрозоля в нижней стратосфере по этим данным.

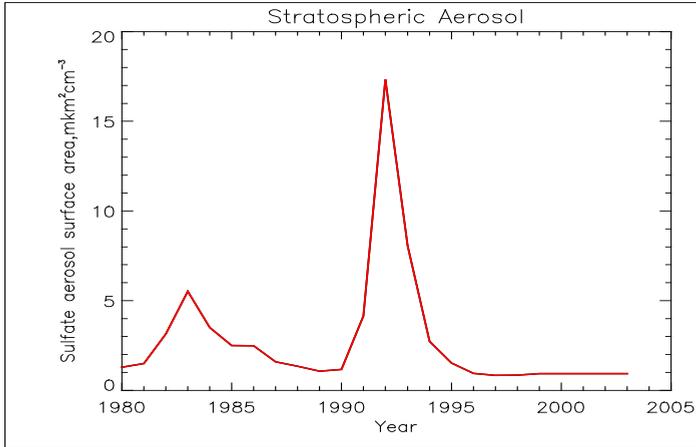


Рис. 1 – Изменение площади поверхности аэрозольных частиц в нижней стратосфере

На рис. 2 и 3 представлены результаты экспериментов по изучению влияния атмосферных аэрозолей на содержание озона и температуру стратосферы. В модельных расчетах учтены потоки газовых примесей и выбросы продуктов извержений вулканов Эль-Чичон (1982 г., Мексика) и Пинатубо (1991 г., Филиппины) (рис. 1), которые были самыми мощными в течение рассматриваемого периода времени.

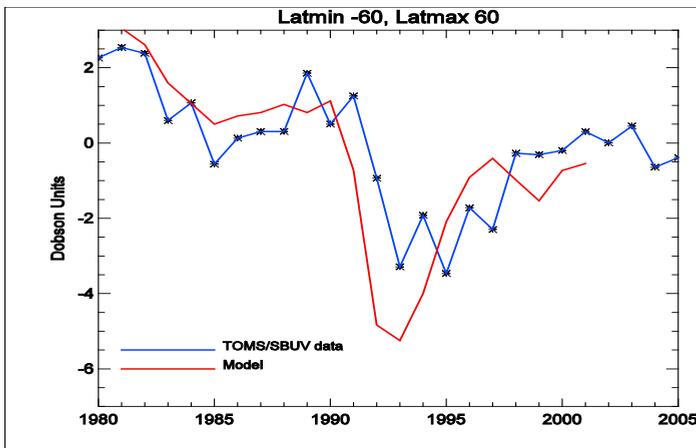


Рис. 2 – Изменчивость содержания озона с учетом извержений вулканов

Увеличение количества аэрозолей после крупных извержений приводит как к ослаблению проникающего солнечного излучения за счет рассеяния, так и к увеличению поглощения солнечной радиации и излучения Земли. В результате последнего эффекта наблюдается уменьшение прямого солнечного излучения и увеличение рассеянного. Суммарный эффект всех этих процессов приводит к нагреву атмосферы на высотах стратосферы, что хорошо заметно на рисунках, когда даже на фоне понижения содержания озона из-за его разрушения продуктами извержения, температура стратосферы некоторое время растет, тем самым усиливая разрушение озона.

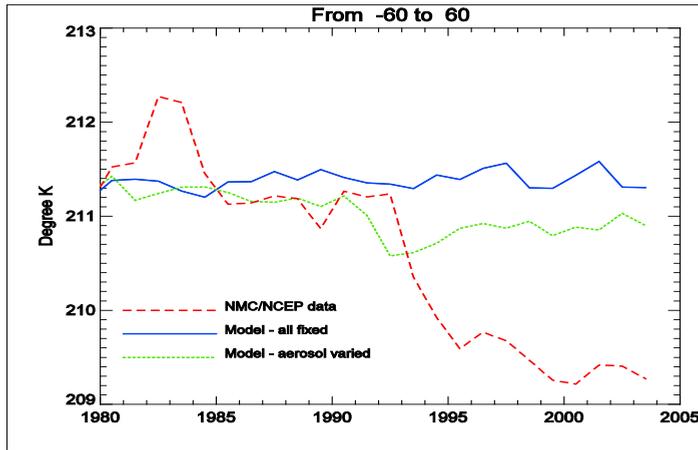


Рис. 3 – Изменчивость температуры стратосферы с учетом извержений вулканов

В целом модель неплохо воспроизводит влияние выбросов аэрозолей, обозначая резкие переходы от минимума к максимуму. Вулканическая активность несомненно является очень важным фактором, но носит больше эпизодический характер, не оказывая особого влияния на общий тренд. К тому же существенное влияние наблюдается лишь в первую половину рассматриваемого нами срока, и в оценке дальнейших, интересующих нас изменений, аэрозоли, как видно, большой роли не играют.

Изменение содержания сульфатного аэрозоля за счет вулканических процессов может привести к увеличению нагрева стратосферы за счет поглощения и рассеяния радиации добавочными частицами аэрозоля. В результате солнечная радиация не доходит до тропосферы, а остается в стратосфере и переходит в ее внутреннюю энергию. Из-за увеличения нагрева стратосферы может происходить изменение интенсивности и направления циркуляционных процессов в стратосфере, осуществляющих перенос массы и тепла.

Для исследования влияния изменчивости сульфатного аэрозоля на нагрев циркуляцию нижней и средней атмосферы были выполнены два модельных эксперимента: один с учетом вулканических выбросов аэрозоля, в соответствии с рис. 4, а в другом содержание аэрозоля фиксировалось на уровне 1979 года, когда не отмечалось крупных вулканических выбросов.

На рис. 4 приведено изменение нагрева атмосферы после извержения вулкана Эль-Чичон в 1983 году.

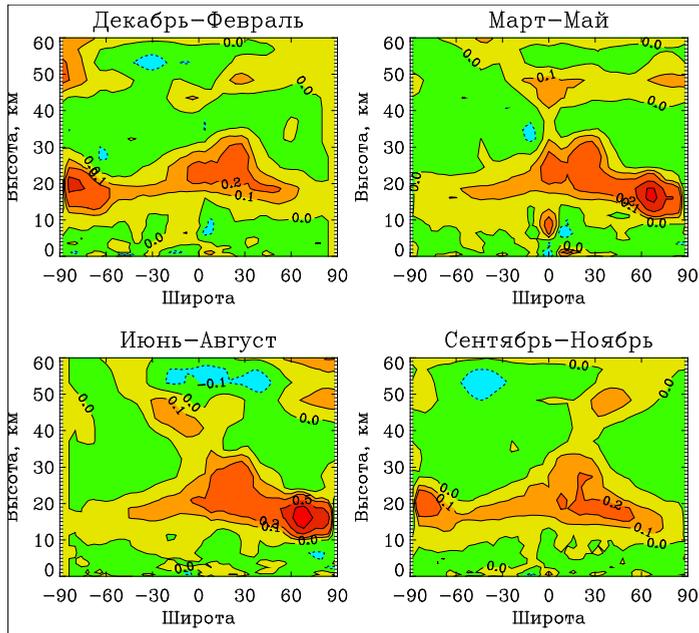


Рис. 4 – Изменение нагрева атмосферы после извержения вулкана Эль-Чичон в 1983 году

Можно отметить, что в результате извержения вулкана Эль-Чичон произошел нагрев стратосферы, местами превышающий 1 градус в день и охлаждение тропосферы в пределах до 0.1 градуса в день. Т.е. эффект в стратосфере получился до 10 раз большим, чем в тропосфере. Кроме того, можно отметить, что и в стратосфере нагрев распределился неравномерно в широтном направлении; с максимумами в средних широтах северного полушария и полярной зоне Южного полушария. Эта неравномерность может привести к изменению циркуляции.

На рис. 5 приведено изменение динамической функции тока, возникающее в результате изменения нагрева после извержения вулкана Эль-Чичон. Видно, что в результате извержения вулкана Эль-Чичон возникают дополнительные ячейки тропосферно-стратосферного обмена. При этом направление переноса массы и тепла чередуется в экваториальной зоне, а в северном полушарии усиливается полярный перенос массы и тепла. В результате этого помимо прямого воздействия вулканов на состав и структуру атмосферы температура и содержание озона могут измениться и в результате переноса тепла и массы.

На рис. 6 и 7 приведены аналогичные результаты изменения атмосферы после извержения вулкана Пинатубо в 1991 году. Извержение этого вулкана было более мощное, что видно по изменению содержания аэрозоля (рис. 1). Соответственно, и изменение нагрева, как видно из рис. 6, является более глобальным и охватывает всю нижнюю стратосферу. При этом нагрев стратосферы происходит более равномерно, чем в случае с Эль-Чичоном, а максимальный нагрев отмечается в средних широтах северного полушария и доходит до 2 градусов в день.

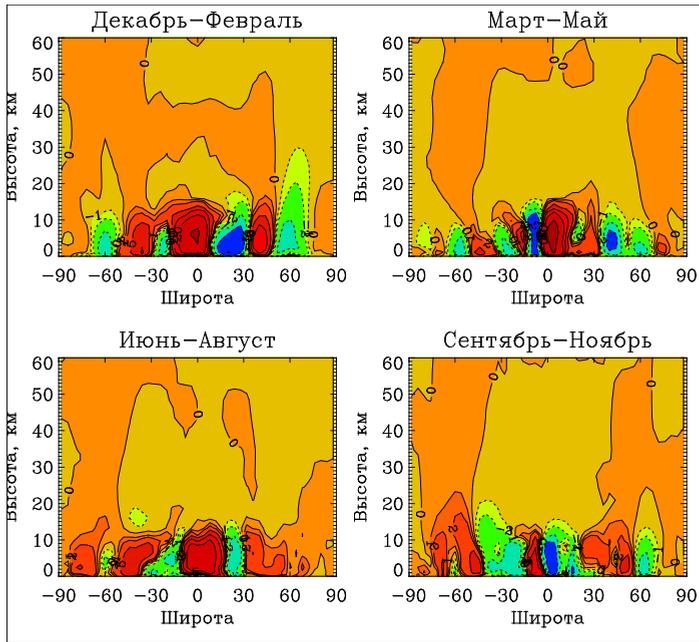


Рис. 5 – Изменение массовой функции тока в нижней и средней атмосфере после выбросов вулкана Эль-Чичон

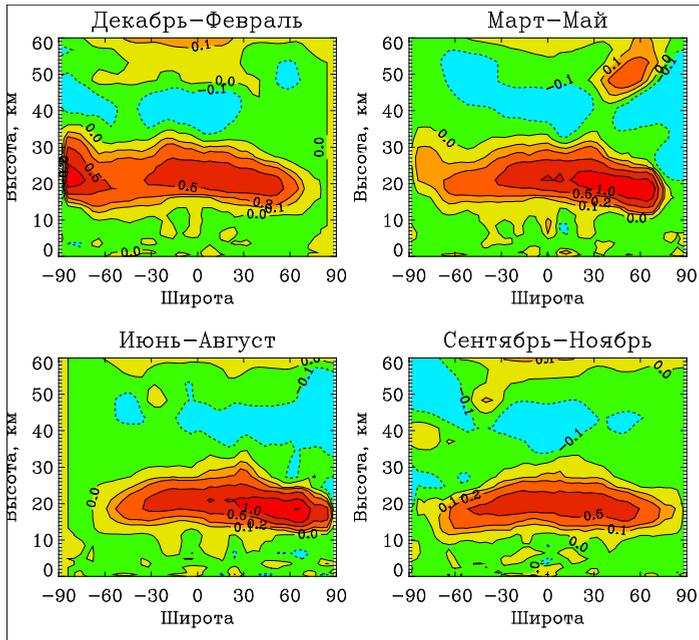


Рис. 6 – Изменение нагрева атмосферы после извержения вулкана Пинатубо в 1991 году

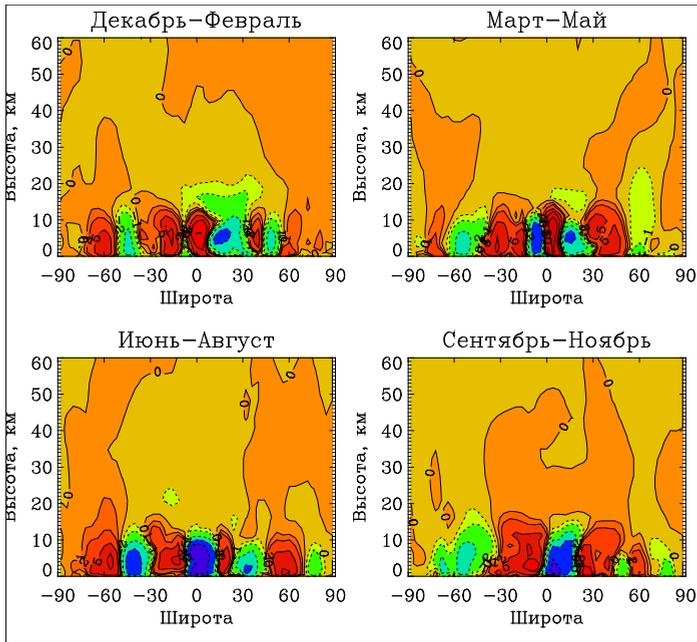


Рис. 7 – Изменение массовой функции тока в нижней и средней атмосфере после выбросов вулкана Пинатубо

Изменение массовой функции тока после извержения Пинатубо показывает, что, как и в случае с Эль-Чичоном, происходит интенсификация тропосферно-стратосферного обмена. При этом равномерность изменения нагрева приводит к тому, что этот обмен по масштабу примерно такой же, как и в случае с Эль-Чичоном. Таким образом, можно заключить, что влияние вулканического изменения аэрозоля на циркуляцию определяется не только мощностью выбросов, но и их неравномерностью и распределением в стратосфере.

Вулканические выбросы могут оказывать влияние на климат долгие годы. Наиболее известное извержение за последние 100 000 лет, было извержение вулкана Тоба на острове Суматра 73 000 лет назад уничтожило древесную растительность на большей части территории современной Индии и привело к резкому глобальному похолоданию. В результате мощнейшего извержения в атмосферу было выброшено примерно  $800 \text{ км}^3$  пепла, а на месте вулкана образовался кратер длиной 100 км и шириной 35 км. Осадочные породы, сформированные этим пеплом, были найдены на территории Индии, на дне Индийского океана: в Бенгальском заливе и Южно-китайском море.

Извержение вызвало так называемый “мгновенный ледниковый период” – резкое похолодание из-за отражения солнечных лучей от поверхности суши, покрытой пылью, а также поглощения солнечной радиации аэрозольными частицами соединений серы, оказавшимися в верхних слоях атмосферы. Это похолодание продолжалось почти 1,8 тысячи лет.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 16.740.11.0184).

### Литература

1. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под редакцией К.Я. Кондратьева. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – 564 с.
2. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Росс.хим.ж., 2008. Т. LII, №5. С. 112-119.
3. Seinfeld, J.H. Atmospheric Chemistry and Physics / J.H. Seinfeld, S.N. Pandis // Wiley Interscience. 1998. P. 22-26.
4. Robock A., Marquardt A., Kravitz B, Stenchikov G. Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering // GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L19703, doi:10.1029/2009GL039209, 2009.
5. Gao C., Robock A., Ammann C. Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based index for climate models core-based index for climate models // J.Geophys.Res. 2008. V.113, D23111, doi:10.1029/2008JD010239.
6. Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М. Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т.40. № 2. С. 211-222.
7. Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyayev S.P. Parameterization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103. № D17. P. 22047-22062.
8. Эммануэль А.Б., Кнорре Р.Б. Основы химической кинетики. Наука. 1968. - 413 с.
9. Jacob, D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry / D.J. Jacob // Princeton Univ. Press. 1999. P.23-24.
10. Brasseur G. Atmospheric Chemistry and Global Change [Текст]/ G. Brasseur, J. Orlando, G. Tyndall, Oxford University Press, 1999
11. Андруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Луце П. Введение в химию окружающей среды. Пер с англ. М.: Мир, 1999.
12. Jacobson M.Z. Fundamental of atmospheric modeling. – University Press, Cambridge, 1999. – 656 pp.

*Е. В. Заболотских, Л. П. Бобылев, А. В. Дикинис*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШТОРМОВЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ

*E. V. Zabolotskich, L. P. Bobilev, A. V. Dikinis*

## USE REANALYSIS DATA AND SATELLITE MEASUREMENTS ESTIMATES FOR THE QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF STORM MEZOTSIKLONOV

*В данной статье рассматриваются основные факторы формирования штормовых циклонов и методика их изучения. Так же в статье рассмотрены методика расчета количественных характеристик активных циклонических образований и использование данных мультисенсорного зондирования для изучения характеристик штормовых циклонов. Предлагаемые методы расчета количественных характеристик рассмотрены для ряда мезомасштабных циклонов.*

*Ключевые слова: штормовые циклоны, мезомасштабные циклоны, активные циклонические образование, космическая съемка, мультисенсорное зондирование, количественные характеристики.*

*This article examines the main factors of storm cyclones and methodology of their study. In the article are also examined the method of calculating the quantitative characteristics of the active cyclonic and the use of multi-sensing data for studying the characteristics of storm cyclones. Methods for calculating the quantitative characteristics for a number of mesoscale cyclones are proposed.*

*Key words: storm cyclones, mesoscale cyclone active cyclone formation, space/satellite imagery, multisensory sensing, quantitative characteristics*

### **Введение**

Необходимость и актуальность исследований, основанных на совместном анализе спутниковых и модельных данных.

Атмосфера является чрезвычайно подвижной средой, где постоянно формируются и разрушаются вихри различных масштабов. Наиболее крупные атмосферные вихри синоптического масштаба достигают в диаметре нескольких тысяч километров, время жизни подобных систем может достигать недели и более. Мезомасштабными циклонами (МЦ) называют циклонические циркуляции в умеренных и высоких широтах с горизонтальными размерами 100-1000 км, которые зарождаются и продол-

жают существовать вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба. Хотя мезомасштабные циклоны и представляют собой нефронтальные образования, они чаще всего возникают в пределах фронтальных циклонических циркуляций синоптического масштаба на фоне относительно низкого давления. Отдельно в категории мезомасштабных циклонов выделяются полярные циклоны — отдельные системы исключительной интенсивности, развивающиеся в умеренных и высоких широтах как результат «взрывного» циклогенеза, и характеризующиеся быстрым развитием (время жизни от нескольких часов до нескольких суток), и штормовыми скоростями ветра [4, 15].

Штормовые циклоны (скорость ветра в которых достигает 15 м/с и более) обычно развиваются в наиболее бароклинные зоны тропосферы. Это происходит в результате возникновения бароклинных атмосферных волн длиной порядка тысячи километров и более. На первой стадии развития в циклоне большие контрасты температуры обусловлены тем, что он состоит из двух разных воздушных масс. Под влиянием адвекции холодной воздушной массы в циклоне формируется вихрь холодного воздуха, и вертикальная мощность его возрастает [2]. Как показывают исследования последних лет, количество штормовых циклонов, особенно над Северной Атлантикой и Балтикой, растет от года к году [9].

Сильный ветер, характерный для штормовых циклонов как синоптического, так и мезомасштабов, усиливает волнение моря и обрушение волн, что при низких температурах воздуха, характерных для морей Северного Ледовитого Океана, может привести к быстрому обледенению судов. Эти особенности представляют серьезную опасность для находящихся в море судов и хозяйственной деятельности прибрежных районов. Кроме того, транспортное морское судоходство, безопасность нефтяных платформ также напрямую связаны с этими штормовыми образованиями. Поэтому своевременное обнаружение и оценка характеристик штормовых циклонов являются крайне актуальной задачей для обеспечения безопасности мореплавания, рыбного и нефтяного промысла и все возрастающего прибрежного строительства в России.

Особенно трудно изучать и предсказывать штормовые мезоциклоны, поскольку большинство численных прогнозов погоды не обладают достаточным временным и пространственным разрешением, пригодным для их исследования. Из-за редкой сети береговых метеостанций и нерегулярных судовых метеорологических наблюдений в море, быстрого перемещения и короткого жизненного цикла мезоциклоны далеко не всегда выявляются в поле давления на фактических приземных картах погоды. В то же время, разрушительная сила мезоциклонов не уступает штормовым циклонам синоптического масштаба [15].

Таким образом, несомненно, что изучение характеристик штормовых циклонов, включая мезоциклоны, отслеживание их движения и, по возможности, прогнозирование, представляют одну из важнейших, до сих пор не решенных задач современной науки. Особую актуальность для российской науки эти исследования приобретают в связи с резким уменьшением в последние годы площади Северного Ледовитого Океана, покрытой многолетними морскими льдами [11]. Причиной сокращения площади ледяного покрова в Арктике становится наблюдаемое значительное потепление климата. Оно наслаивается на погодные явления, которые также вызывают

уменьшение льдов. В 2007 году была зафиксирована минимальная площадь льдов [11]. С появлением новых районов открытой воды связано появление новых районов, потенциально пригодных для зарождения полярных циклонов. Такие моря, как Восточно-Сибирское, Чукотское, море Лаптевых, раньше закрытые ледяным покровом в течение всего года, к осени становятся свободными ото льда, а значит, подверженными возникновению и развитию полярных циклонов. Предварительные исследования подтверждают этот вывод.

Появление в последние годы спутников, оснащенных активными и пассивными микроволновыми приборами, обладающих более высоким разрешением и широкой полосой обзора, значительно расширило возможности, связанные с получением информации о штормовых циклонах [1]. В сочетании со спутниковыми изображениями облачности, с данными гидрометеорологических станций на побережье и результатами моделирования это дает возможность исследовать зарождение и эволюцию циклонов со значительно более высоким временным разрешением, детальностью и точностью, чем это было возможно ранее.

Изображения радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA), например, RADARSAT Synthetic Aperture Radar (SAR), Envisat Advanced SAR (ASAR) представляют собой ценнейший источник информации, так как обладают высоким разрешением и обеспечивают исследователей детальной структурой поля приводного ветра независимо от погодных условий [10]. Дополнительным источником информации о поле ветра служат данные скаттерометров, например, данные Quik SCAT Sea winds скаттерометра (до сентября 2009 года) и **Метоп ASCAT скаттерометра** [13]. Хотя разрешением такие данные существенно уступают данным PCA, регулярность их получения (более 2-х раз в сутки) расширяет возможности их использования.

Штормовые циклоны, в том числе, полярные циклоны, отчетливо проявляются на снимках видимого и инфракрасного диапазонов (спектральные радиометры MODIS на спутниках Terra и Aqua, радиометры AVHRR на серии спутников NOAA) [6]. Однако, несмотря на увеличивающуюся доступность и частоту таких изображений, они отражают только структуру верхнего слоя облачности, поэтому при использовании требуют привлечения дополнительных данных [15].

Уникальные возможности для изучения полярных циклонов могут обеспечить данные многоканальных сканирующих спутниковых радиометров, таких как Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) и Special Sensor Microwave Image rand Sounder (SSMIS) на борту спутников серии Defense Meteorological Satellite Programme (DMSP) и Advanced Microwave Scanning Radiometer Earth Observing System (AMSR-E) на борту Aqua [12]. Так же, как и перечисленные выше приборы, эти радиометры регистрируют излучение в широкой (около 1400 км) полосе обзора. Кроме того, последний радиометр AMSR-E обладает более высоким, по сравнению с радиометром SSM/I, разрешением. Измерения SSM/I и AMSR-E дают возможность восстанавливать такие характеристики атмосферы и океана как интегральное содержание водяного пара в атмосфере, интегральное содержание жидкокапельной влаги в облаках, скорость приводного ветра. Данные микроволновых радиометров Advance Microwave Sounding Unit (AMSU) на борту спутников NOAA позволяют получать поля жидких осадков и содержания кристаллической воды в облаках. Регулярность (в полярных районах

временное разрешение составляет несколько раз в сутки), независимость от времени суток и погодных условий делает их бесценным источником информации, а наличие точных методов определения различных геофизических параметров, позволяет получать не только качественную картину зарождения, движения и заполнения циклонов, но и количественно оценивать их характеристики.

В течение нескольких последних декад основную массу работ, связанных с изучением структуры и развития штормовых мезоциклонов, представляли исследования в виде рассмотрения и анализа конкретных случаев циклонов. Стремление обобщить и классифицировать штормовые циклоны базировалась как на их проявлениях на спутниковых изображениях, так и на изучении механизмов их формирования, обусловленных той или иной синоптической ситуацией. Анализ синоптической ситуации проводился как с использованием фактических данных (карт приземного анализа), так и с привлечением модельных данных (например, данных реанализа).

Наиболее перспективным при изучении штормовых циклонов представляется совместное использование данных различных приборов, позволяющее провести наиболее полный анализ погодной системы с привлечением всех возможных источников качественной и количественной информации.

В настоящей работе предлагается методология изучения штормовых циклонов, включая мезоциклоны, основанная на комбинации количественного анализа синоптической ситуации и использования спутниковых данных, включающего как анализ снимков в различном диапазоне электромагнитного спектра, так и расчет параметров системы атмосфера-океан по данным спутниковых многоканальных сканирующих радиометров.

### **Методология**

#### **1. Методика расчета количественных характеристик активных циклонических образований**

Для возникновения мезоциклона необходимо, чтобы в какой-либо крупномасштабной циркуляционной системе существовало (или вновь образовалось) мезомасштабное возмущение или неоднородность масштаба мезо- $\alpha$ . Например, завихренность в свободной атмосфере (следствие существующего или существовавшего фронтального циклона), мезомасштабная фронтальная или ветровая волна, мезофронт (на границе суша — море, на границе ледового покрова и т. п.). Любое подобное возмущение (неоднородность) может дать начало мезовихрю конвективного происхождения либо мезоциклону. Последний разовьется, если мезовозмущение попадет в условие горизонтальной неоднородности полей температуры и влажности синоптического масштаба, т. е. если возмущение окажется в условиях бароклинной неустойчивости. В процессе развития мезоциклона бароклинность возрастает, так как происходит, с одной стороны, приток влажного и теплого воздуха, а с другой — сухого и холодного [3].

Динамическая неустойчивость атмосферы является одним из необходимых условий возникновения возмущения синоптического масштаба. Однако и прямо, и косвенно она участвует в генерации малых возмущений. Так, при возникновении мезоциклонов наличие динамической неустойчивости непосредственно влияет на фор-

мирование этих возмущений. Иницируя процесс крупномасштабного циклогенеза, динамическая неустойчивость, тем самым, косвенно влияет на формирование малых возмущений, так как возникающая циклоническая циркуляция способствует разрешению статической неустойчивости. Для количественной оценки динамической неустойчивости существует множество различных показателей. Наиболее общим из них является показатель, который включает в себя как баротропную (два первых члена в правой части уравнения 1), так и бароклинную неустойчивость (третий член в правой части уравнения 1). В умеренных и высоких широтах баротропными членами можно пренебречь, так как они, по крайней мере, на порядок меньше третьего, бароклинного, члена [3].

$$DI = \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial n} + \frac{\partial^2 V}{\partial n^2} + \frac{l^2}{\sigma} \frac{\partial^2 V}{\partial P^2}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус кривизны линий тока,  $V$  – вектор скорости ветра,  $n$  – нормаль к линии тока, направленная вправо от направления течений,  $l$  – параметр Кориолиса,  $P$  – давление (Па)

$$\sigma = \frac{\partial \Phi}{\partial P} \frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial P}, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – геопотенциал ( $\text{м}^2/\text{с}^2$ ),  $P$  – давление (Па),  $\theta$  – потенциальная температура.

Циклогенез является процессом, охватывающим практически всю тропосферу. Поэтому в данной работе при расчете динамической неустойчивости была принята во внимание бароклинность наиболее активной части тропосферы, то есть в слое от 850 до 300 гПа. Использовался безразмерный параметр динамической неустойчивости:

$$D = \frac{DI_{850}^{500} + DS_{700}^{300}}{2 \cdot 10^{-10}}, \quad (3)$$

где  $DI_{850}^{500}$  – показатель неустойчивости в слое 500-850 гПа,  $DS_{700}^{300}$  – в слое 300-700 гПа.

Для возникновения мезоциклона необходимо выполнение еще одного динамического условия. Таким условием является *спиралевидность движения*:

$$Sp = \text{Vtot}V \approx v \frac{\partial u}{\partial z} - u \frac{\partial v}{\partial z}. \quad (4)$$

Спиралевидность математически определяется как скалярное произведение вектора на завихренность, и относится к числу важнейших динамических характеристик вихревого течения [3]. Также спиралевидность можно определить как меру наклона оси вихря по отношению к вектору скорости течения воздуха [5]. В работе спиралевидность вычислялась в виде ее суммарного значения для слоев: 700-850, 500-700 и 300-500 гПа, для определения безразмерного параметра спиралевидности суммарное значение нужно отнести к среднему значению спиралевидности при циклогенезе  $\bar{Sp} \approx 1.13 \cdot 10^{-2}$  м/с.

Интенсивность термической адвекции (переноса тепла при горизонтальном движении воздуха) определяется величиной той части локального изменения температу-

ры, которая зависит от этого процесса. Термическая адвекция выражается скалярным произведением  $V \cdot \nabla T$ , где  $V$  — скорость течения, а  $\nabla T$  — горизонтальный асцендент температуры. Скорость  $V$  по величине и направлению определяется барическим градиентом, будучи перпендикулярна к нему. Если барический и температурный градиенты параллельны, т. е. если абсолютные и относительные изогипсы параллельны, то термическая адвекция равна нулю. Напротив, при взаимной перпендикулярности обоих градиентов, т. е. при перпендикулярности абсолютных и относительных изогипс, термическая адвекция достигает максимального значения. Влияние адвекции тем больше, чем больше горизонтальный градиент температуры воздуха, чем больше скорость ветра и чем больше совпадают по направлению оба эти вектора.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{dT}{dt} - \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Там, где совпадают наибольшие значения  $DI$  и  $Sr$ , можно ожидать развития мезоциклона из первоначального возмущения (неоднородности). Однако даже при наличии благоприятных динамических условий мезоциклон не возникнет, если поле движений кинематически не подготовлено соответствующим образом. Мезоциклон возникнет только в том случае, если в области совпадения наибольших значений  $DI$  и  $Sr$  пересекаются изолинии кинематических характеристик:

$$c = \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (6)$$

В настоящей работе для отобранных случаев штормовых циклонов по формулам (1-4) был проведен расчет величин показателя динамической неустойчивости, спиралевидности атмосферного движения и адвекции воздушной массы с использованием данных реанализа NCEP/NCAR.

## **2. Использование данных мультисенсорного зондирования для изучения характеристик штормовых циклонов**

Численные модели атмосферы, предсказывающие на основании анализа начальных условий ее будущее состояние, являются важнейшим инструментом изучения мезомасштабных штормовых циклонов и предсказания их возникновения и развития. Однако, небольшой размер полярных циклонов, относительно высокая степень влияния внутренних механизмов воздействия, таких как высвобождение скрытого тепла, быстрая эволюция, большой диапазон интенсивностей и отсутствие данных наблюдений усложняют задачу моделирования этих мезомасштабных погодных систем. При изучении работ, связанных с удачным численным моделированием некоторых случаев полярных циклонов, продемонстрировавших адекватное соответствие данным наблюдений, следует иметь в виду, что большая часть случаев отсутствия подобного соответствия не попала в опубликованные работы. Пример подобного случая приведен в работе [14]. Данный полярный циклон предпринимали попытку описать при помощи численного моделирования разные авторы, и у всех она оказывалась неудачной: никто не мог спрогнозировать наблюдаемую эволюцию циклона.

В связи с этим, привлечение в исследованиях мезомасштабных циклонов спутниковой информации остается насущной необходимостью, поскольку, являясь инструментом для валидации численных моделей, спутниковые измерения также позволяют получить всестороннюю и наиболее полную информацию — как качественную, так и количественную — об этих опасных атмосферных явлениях.

Использование данных мультисенсорного зондирования для изучения характеристик штормовых циклонов основывается на привлечении как можно большего количества спутниковых измерений приборов в различных областях электромагнитного спектра с целью получения наиболее полной качественной и количественной информации о циклоне в наиболее высоком временном разрешении. В дополнение к спутниковым измерениям при этом используются все доступные контактные измерения, такие как, измерения скорости приводного ветра океаническими буями, измерения профилей атмосферных метеопараметров радиозондами, синоптические наблюдения и др.

Предлагаемая методология изучения штормовых мезоциклонов на настоящий момент базируется на использовании данных следующих приборов:

- 1) Снимков видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов спектра радиометров MODIS на спутниках Terra и Aqua и AVHRR на спутниках серии NOAA.

Исторически методы интерпретации снимков начали развиваться самыми первыми. Главной отличительной чертой их является субъективность, поскольку сами методы представляют из себя визуальный анализ изображений облачности в видимом и инфракрасном диапазонах. Тем не менее, спутниковые данные ИК и видимого диапазонов обеспечивают нас ценнейшей информацией о форме и структуре облачности, ассоциированной с развитием мезомасштабных циклонов. Эта информация позволяет судить о воздушных массах и физических процессах, вовлеченных в образование рассматриваемых систем. Видимые и ИК изображения дают возможность определять расположение циклонов и температуру верхних слоев облачности. При наличии близко расположенных данных радиозондирования или обоснованных модельных атмосферных профилей, по этим данным может быть оценена высота верхней границы облаков. Снимки позволяют примерно оценить диаметр циклона, хотя не всегда его облачная структура может быть прямо отнесена к поверхностным проявлениям без привлечения дополнительных данных. Также, данные видимого и инфракрасного диапазонов позволяют судить о времени жизни циклона. Поскольку мезоциклоны, включая полярные циклоны, формируются за счет различных физических механизмов, в зависимости от природы этих механизмов различаются и форма и структура облачности: разные типы вихрей обладают разными облачными сигнатурами, четко идентифицируемыми на видимых и ИК изображениях. Среди типичных проявлений полярных циклонов в структуре облачного покрова выделяются такие сигнатуры как облачная запятая, спиралевидные структуры, мгновенные окклюзии, сигнатуры в форме лебедя, бароклинные волны и др. К сожалению, все достоинства рассматриваемого анализа сводятся к нулю, если мезомасштабный циклон, представляющий собой в значительной мере поверхностное явление, закрыт сверху слоем облаков, не позволяющих сигналу от облачности, связанной с развитием циклона, достичь датчика спектрадиометра. В этом случае анализ изображений может быть как затруднен, так и вовсе невозможен.

2) Изображений РСА со спутников RADARSAT и Envisat.

Высокое пространственное разрешение данных РСА позволяет независимо от облачности и времени суток визуально идентифицировать в полях приводного ветра вихревые структуры даже небольших размеров, выходящих за рамки возможностей других приборов. Помимо вихревых структур мезомасштаба, РСА снимки отражают вариации приводного ветра микромасштаба, что обеспечивает возможность изучения таких деталей атмосферных процессов, которые оказываются за рамками возможностей пространственного разрешения любых других приборов. Подавляющее большинство микро- и мезомасштабных проявлений атмосферных процессов на РСА-изображениях поверхности океана коррелируют с облачными сигнатурами соответствующих явлений на снимках видимого и ИК-диапазонов. Низкое и нерегулярное временное разрешение приборов в сочетании с высокой стоимостью снимков существенно ограничивают использование этого спутникового ресурса в изучении мезовихрей.

3) Полей ветра низкого разрешения (12.5 км) по данным скаттерометров Seawinds со спутника QuikSCAT до ноября 2009 года и ASCAT со спутника Metop с марта 2009.

Недостаток снимков РСА, связанный с их редкостью и стоимостью, частично могут восполнить данные активных микроволновых скаттерометров, которые отличаются регулярностью, широкой полосой обзора (1400 км для QuikSCAT Seawinds и две полосы по ~500 км) и доступностью. Скаттерометрические измерения также позволяют восстанавливать поля приводного ветра независимо от облачности и времени суток, но уже с существенно более низким разрешением

4) Спутниковых данных сканирующих микроволновых радиометров SSM/I и SSMIS на борту серии спутников DMSP пространственного разрешения 25 км и радиометра AMSR-E на борту спутника Aqua пространственного разрешения 10 км.

Как было отмечено во введении, широкая полоса обзора (1400 км), высокое временное разрешение (до 6 раз в сутки для широт выше 70° с.ш.), независимость от времени суток и погодных условий, возможность восстановления целого ряда геофизических параметров атмосферы и океана, позволяют с успехом использовать эти данные для изучения любых атмосферных явлений, в том числе, и для изучения мезовихрей. Авторами работы [7] были созданы алгоритмы оценки полной массы водяного пара (влагозапаса) в атмосфере Q и жидкокапельной влаги (водозапаса) облаков W, обладающие повышенной точностью при неблагоприятных погодных условиях. Было доказано [8], что мезомасштабные циклоны имеют четко выраженную вихревую сигнатуру в поле атмосферного водяного пара. Изучение полей водяного пара, полученных при помощи менее точных алгоритмов, показало, что для идентификации циклонов в полях водяного пара точность алгоритма имеет решающее значение. Перспективность использования восстановленных полей Q в качестве основного источника информации о мезомасштабных циклонах связана с независимостью от верхних слоев облачности (в отличие от снимков спектральных радиометров), доступностью и регулярностью (в отличие от снимков РСА). Так же, как и скаттерометрические измерения, пассивные микроволновые данные позволяют восстанавливать скорость приводного ветра V, являющуюся главной отличительной характеристикой штормового циклона. Авторами разработан также алгоритм оценки V (неопубликованный) по данным AMSR-E.

Таким образом, пакет разработанных алгоритмов позволяет наиболее эффективным образом использовать рассматриваемые данные: детектировать мезомасштабные циклоны в полях атмосферного водяного пара, определять размеры, траекторию и время жизни атмосферных образований, оценивать их численные характеристики —  $Q$ ,  $W$ ,  $V$ , их минимальные и максимальные значения.

5) Продуктов спутниковых данных микроволновых зондировщиков AMSU-B на борту спутников NOAA пространственного разрешения 50 км.

Также, как и данные микроволновых сканирующих радиометров, данные зондировщиков отличаются регулярностью и высоким временным разрешением, особенно учитывая постоянное наличие на орбите нескольких спутников NOAA. **Готовые продукты AMSU-B** — это интенсивность дождя  $R$  и содержание кристаллической воды (льда) в облачности  $IWP$ . **Сведения о данных параметрах повышают информативность** исследования, дополняя данные других приборов, хотя низкое пространственное разрешение AMSU-B является существенным недостатком при исследовании мезомасштабных явлений.

### **3. Примеры применения методологии для ряда мезомасштабных циклонов**

Применение описанной методологии проиллюстрировано несколькими примерами изучения мезомасштабных циклонов в Баренцевом море в марте 2010 года. Все рассмотренные атмосферные вихри относятся к категории полярных циклонов (ПЦ), т.е. отличаются интенсивностью, высокими скоростями приводного ветра и стремительным развитием. Климат Баренцева моря находится под влиянием тёплого Атлантического океана и холодного Северного Ледовитого океана. Частые вторжения тёплых атлантических циклонов и холодного арктического воздуха определяют большую изменчивость погодных условий. Зимой над морем преобладают юго-западные, весной и летом — северо-восточные ветры. В связи с этим, март представляется критическим для данного моря месяцем, когда преимущественное направление ветров и температурный режим способствуют образованию полярных циклонов.

Все обнаруженные мезомасштабные циклоны сформировались в результате так называемых холодных вторжений, когда воздушные массы с севера с температурой ниже  $-25^{\circ}\text{C}$ , распространялись над теплой (около  $+3^{\circ}\text{C}$ ) открытой северной частью моря к северо-востоку от Новой Земли.

На Рис.1 представлены 2 инфракрасных изображения MODIS и изображение EnvisatASAR полярного циклона в Баренцевом море 5 марта 2010 года, развитие которого сопровождалось формированием спиралевидной структуры облаков и вихревой структуры штормового приводного ветра.

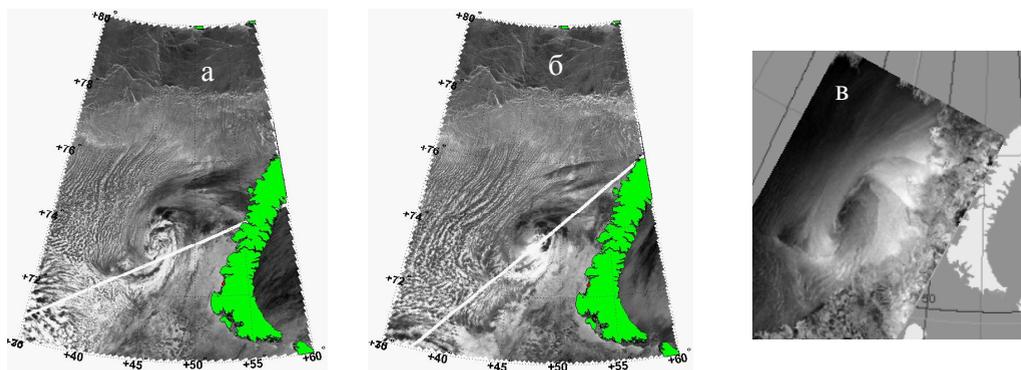


Рис. 1 – ИК изображения MODIS (канал 11.8 мкм) ПЦ в Баренцевом море 5 марта 2011 г. (а) – 8:45; (б) – 16:25 всемирного времени (BB) и (в) – изображение EnvisatASAR 8:00 BB

Данный циклон сформировался в результате холодного вторжения с севера в ночь с 4 на 5 марта. Временной ряд спутниковых данных не позволяет с уверенностью зафиксировать момент начала формирования ПЦ. Можно лишь утверждать, что вечером 4 марта ПЦ не детектировался ни одним из спутниковых приборов. Вторжение сухой холодной воздушной массы с севера, усиление северо-восточного ветра привели к соприкосновению холодного арктического воздуха с относительно теплой поверхностью Баренцева моря. Пограничный слой атмосферы стал неустойчивым, причем неустойчивость усиливалась вниз по потоку. Над морской поверхностью развилась упорядоченная конвекция, что проявилось в формировании конвективных облачных гряд, и ячеек, хорошо различимых на изображениях MODIS.

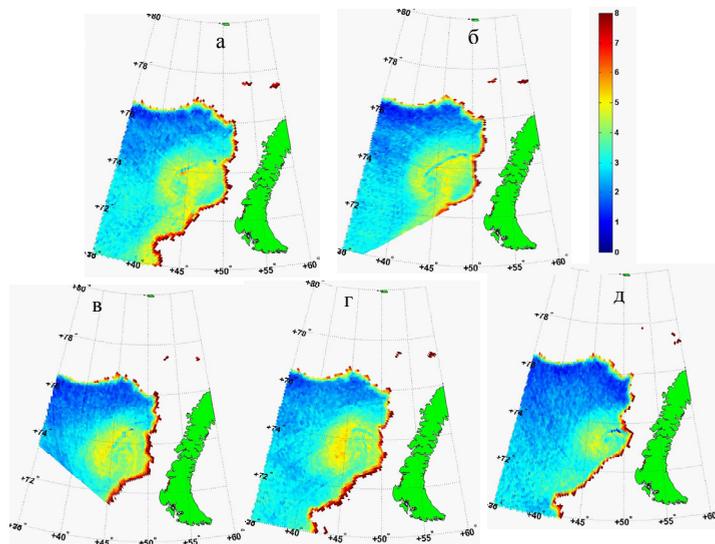


Рис. 2 –Поля влагозапаса атмосферы  $Q$  ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ), восстановленного по данным AMSR-E (а) – 00:58; (б) – 02:37; (в) - 06:44; (г) - 08:23 5 марта 2010 г. и (д) - 6 марта 2010 г. 00:03

Развитие и траектория полярного циклона хорошо прослеживаются по полям атмосферного водяного пара, восстановленного по данным AMSR-E (Рис. 2). В центре циклона наблюдается минимум водяного пара около  $3 \text{ кг/м}^2$ . Максимальное значение водяного пара —  $5.5 \text{ кг/м}^2$ . Следующий по времени микроволновый снимок AMSR-E свидетельствует о полной диссипации ПЦ ночью 6-го марта. Таким образом, данный мезомасштабный вихрь, диаметром около 500 км, просуществовал чуть более суток.

Характерные для полярного циклона высокие скорости ветра были подтверждены как скаттерометрическими измерениями MetopASCAT, так и восстановленными по данным AMSR-E полями скорости приводного ветра (Рис. 3).

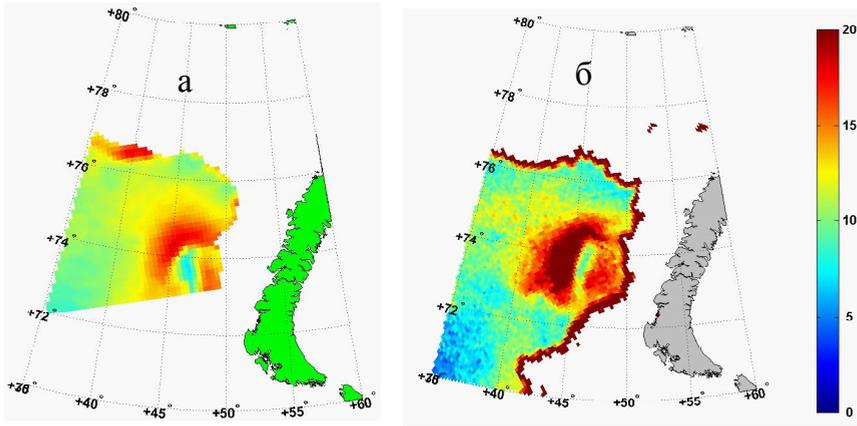


Рис. 3 — Скорости приводного ветра по данным MetopASCAT 5 марта 2010 11:25 (а) и по данным AMSR-E 5 марта 2010 8:43 (б)

Следующий циклон над той же самой территорией сформировался через несколько дней — 8 марта 2010 года. Данный циклон просуществовал всего несколько часов. Изображения циклона на снимках MODIS инфракрасного диапазона и EnvisatASAR представлены на рис. 4.

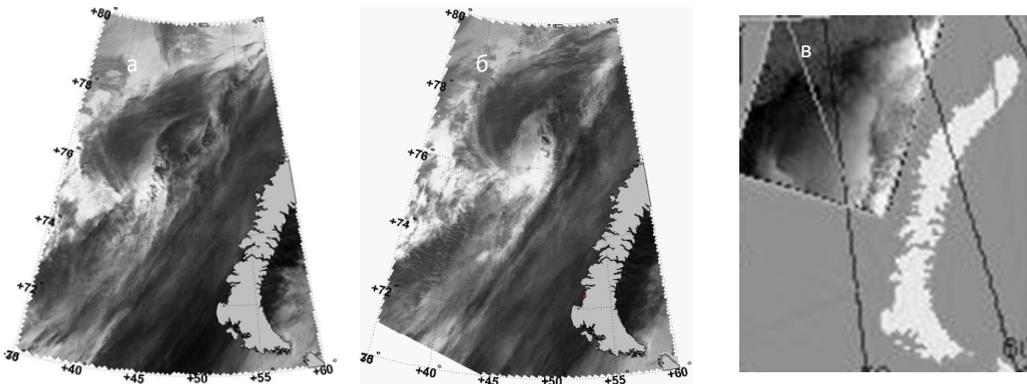


Рис. 4 — ИК изображения MODIS (канал 11.8 мкм) ПЦ в Баренцевом море 8 марта 2011 г. (а) — 7:35; (б) — 8:50 и (в) — изображение EnvisatASAR 8:00

Поскольку время жизни данного полярного циклона составило около 6 часов 4 микроволновых снимка AMSR-E позволили получить и проанализировать поля водяного пара (Рис. 5) и скоростей приводного ветра (Рис. 6). Минимальное значение влагозапаса атмосферы составило  $5.8 \text{ кг/м}^2$ , максимальное —  $11.5 \text{ кг/м}^2$ . Скорость ветра в мезоциклоне превысила  $22 \text{ м/с}$

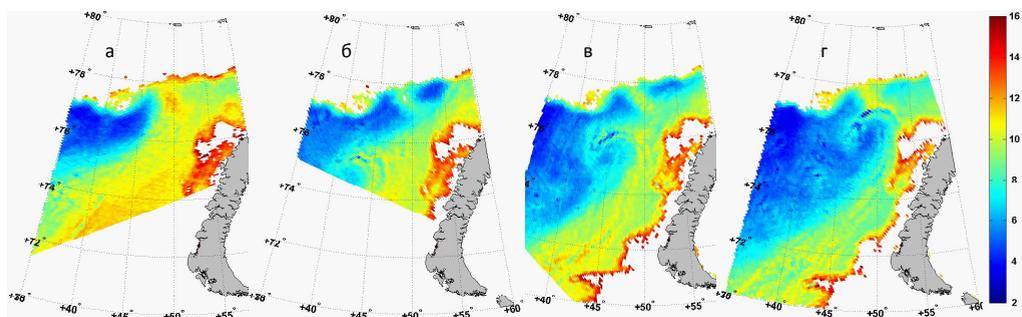


Рис. 5 — Поля влагозапаса атмосферы  $Q \text{ (кг/м}^2\text{)}$ , восстановленные по данным AMSR-E (а) — 02:48; (б) — 05:56; (в) - 07:35; (г) - 09:14 8 марта 2010 г.

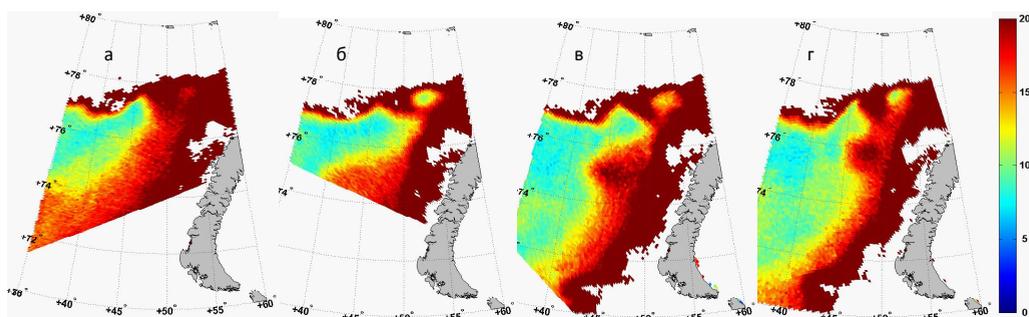


Рис. 6 — Поля приводного ветра  $V \text{ (м/с)}$ , восстановленные по данным AMSR-E (а) — 02:48; (б) — 05:56; (в) - 07:35; (г) - 09:14 8 марта 2010 г.

Наконец, последний из серии мезоциклонов в марте 2010 года сформировался над данным регионом 15 марта и просуществовал чуть более суток. ИК изображение облачности, сопровождающей циклон в стадии полного развития, и снимок Envi-satASAR, отражающий вихревую структуру приводного ветра, приведены на рис. 7. Развитие циклона, представленное в наблюдаемых изменениях полей атмосферного влагозапаса, изображено на рис. 8. В центре циклона наблюдается минимум водяного пара около  $3.2 \text{ кг/м}^2$ . Максимальное значение влагозапаса —  $4.2 \text{ кг/м}^2$ .

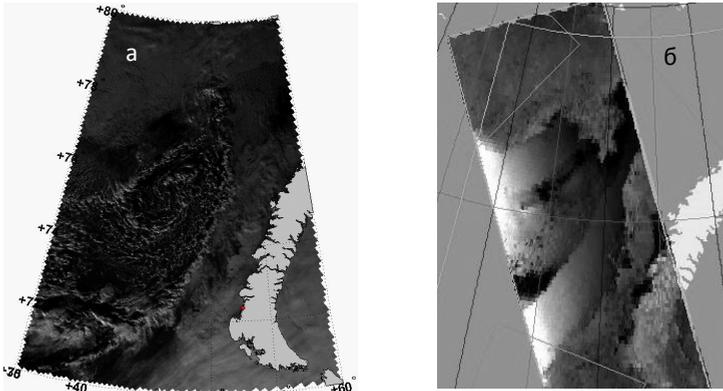


Рис. 7 – (а) ИК изображения MODIS (канал 11.8 мкм) ПЦ в Баренцевом море 15 марта 2011 года – 10:35; и (б) – изображение EnvisatASAR 17:40

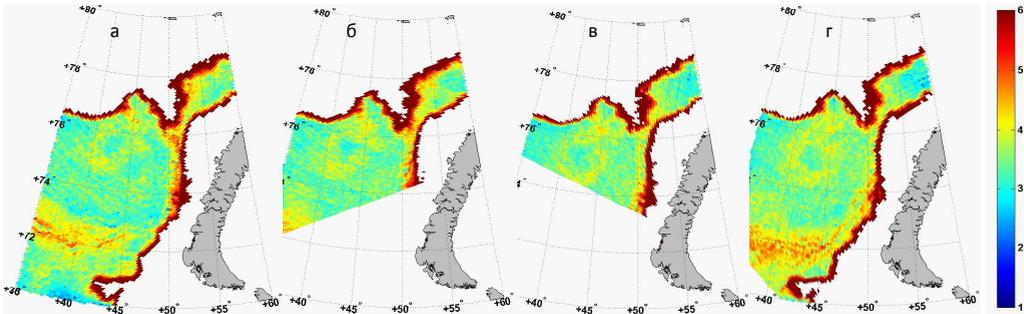


Рис. 8 – Поля влагозапаса атмосферы  $Q$  ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ), восстановленные по данным AMSR-E (а) – 01:15; (б) – 02:54; (в) – 06:02; (г) – 07:41 15 марта 2010 г.

## Заклучение

Необходимость расширения возможностей для исследований таких экстремальных явлений, как штормовые мезоциклоны, связана как с недостаточным пространственным и временным разрешением большинства численных моделей, так и с редкой сетью береговых метеостанций и нерегулярными судовыми метеорологическими наблюдениями в море. Быстрое перемещение и короткий жизненный цикл мезоциклонов дополнительно усложняют изучение этих явлений. В то же время, разрушительная сила штормовых мезоциклонов огромна. Сильные ветры с бортовой и килевой качкой, приводят к потере скорости, ограничению комфортности условий обитания моряков и рыбаков, создают угрозу безопасности судна и затрудняют проведение производственных операций. Поэтому своевременное обнаружение мезоциклонов и изучение их характеристик являются актуальной задачей современной науки.

Предложенная методология изучения штормовых циклонов, основанная на комбинации количественного анализа синоптической ситуации и использования

спутниковых данных, включающего анализ снимков в различном диапазоне электромагнитного спектра и построение полей параметров системы атмосфера-океан по данным спутниковых многоканальных сканирующих радиометров, направлена на преодоление ограниченности наземных метеорологических наблюдений, позволяющих диагностировать мезоциклоны. Рассмотренные примеры позволяют сделать вывод о ее применимости и возможности совместного использования данных различных приборов для наиболее полного анализа погодных систем с привлечением всех возможных источников качественной и количественной информации.

Работа выполнена в рамках 1.2.2 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № П1570 от 10 сентября 2009 г.) по направлению «Мониторинг и прогнозирование состояния атмосферы и гидросферы».

### Литература

1. *Гурвич И.А., Митник Л.М., Митник М.Л.* Мезомасштабный циклогенез над дальневосточными морями: исследование на основе микроволновых радиометрических и радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса, 2008(5) с. 58–73.
2. *Мохов И.И., Акперов М.Г., Лагун В.Е., Луценко Э.И.* Интенсивные арктические мезоциклоны // Изв. РАН. Физика океана и атмосферы, 2007, Т. 43(3), с. 291–297.
3. *Русин И.Н., Тараканов Г.Г.* Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. — СПб.: Изд-во РГГМУ, 1996 г. — 207 с.
4. *Степаненко В. М., Вельтищев Н. Ф.* Мезометеорологические процессы. — М.: Изд-во «Географический факультет МГУ», 2007. — 127 с.
5. *Шакина Н.П.* Динамика атмосферных фронтов и циклонов. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 263 с.
6. *Bader M.J., G.S. Forbes, J.R. Grant, R.B.E. Lilley and A.J. Waters.* Images in weather forecasting. Cambridge-University Press, Cambridge, UK, 1995, 523 P.
7. *Bobylev L. P., E. V. Zabolotskikh, L. M. Mitnik, and M. L. Mitnik.* Atmospheric Water Vapor and Cloud Liquid Water Retrieval over the Arctic Ocean Using Satellite Passive Microwave Sensing, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 48, No. 1, pp. 283 – 294, doi: 0.1109/TGRS.2009.2028018, 2010
8. *Bobylev L., E. Zabolotskikh, L. Mitnik, and M. Mitnik.* Arctic Polar Low Detection and Monitoring Using Atmospheric Water Vapor Retrievals from Satellite Passive Microwave Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, special issue, 2011 (в печати).
9. *Bracegirdle T. J. and S. L. Gray.* An objective climatology of the dynamical forcing of polar lows in the Nordic seas // Int. J. Clim., 2008, vol.28, pp. 1903–1919.
10. *Chunchuzov I., Vachon P.W., Ramsay B.* Detection and characterization of polar mesoscale cyclones in RADARSAT Synthetic Aperture Radar images of the Labrador Sea // Canadian J. Rem. Sens. 2000, vol. 26, pp. 213–230.
11. *Comiso J. C., C. L. Parkinson, R. Gersten, and L. Stock,*2008, Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // Geophys. Res. Lett., 35, L01703, doi:10.1029/2007GL03197.
12. *Mitnik L.M., Mitnik M.L., Gурвич I.A.* Passive and active microwave sensing of winter mesoscale cyclones over the ocean // Proc. IGARSS'06, Denver, Colorado, 31 July–4 August 2006.
13. *Monaldo F. M., D. R. Thompson, W. G. Pichel and P. Clemente-Col n.* A systematic comparison of QuikSCAT and SAR ocean surface speeds // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2004, vol. 42, pp. 283–291.
14. *Rasmussen E.* A case study of a polar low development over the Barents Sea // Tellus, 1985, vol. 37A, pp. 407–418.
15. *Rasmussen E., Turner J.* Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. CambridgeUniversity Press, 2003, 612 P.

*О.И. Шевчук, В.Н. Малинин*

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПАРЕНИЯ НА УРОВЕНЬ МИРОВОГО ОКЕАНА

*O.I. Shevchuk, V.N. Malinin*

## INFLUENCE OF EFFECTIVE EVAPORATION AT SEA LEVEL

Обсуждается вклад эвстатических факторов в межгодовые колебания уровня Мирового океана (УМО). Рассматривается межгодовая изменчивость испарения, осадков и эффективного испарения для отдельных океанов. Приводятся оценки УМО за период с 1981 по 2011 годы, рассчитанные с помощью модели по данным об эффективном испарении с поверхности океанов.

Ключевые слова: испарение, осадки, эффективное испарение, уровень Мирового океана, прогноз.

*Contribution of eustatic factors into interannual variations of Sea level is discussed. Interannual variability of evaporation, precipitation and effective evaporation is considered for specific oceans. Sea level assessments for 1981-2011 are provided based on sea surface effective evaporation data model.*

*Kew words: evaporation, precipitation, effective evaporation, sea level, forecast.*

В общем случае изменения уровня Мирового океана ( $\Delta h_M$ ) можно представить в виде суммы эвстатической ( $\Delta h_Э$ ), стерической ( $\Delta h_C$ ) и деформационной ( $\Delta h_D$ ) компонент, т.е.

$$\Delta h_M = \Delta h_Э + \Delta h_C + \Delta h_D \quad (1)$$

Однако роль отдельных компонент в суммарных колебаниях уровня Мирового океана (УМО) существенно различна. По-видимому, можно пренебречь суммарным вкладом в  $\Delta h_M$  деформационных колебаний. Так, есть основания полагать, что в современных климатических условиях при глобальном осреднении колебания уровня за счет тектонических движений земной коры, имеющие разный знак в различных регионах Земли, нивелируют друг друга. Что касается донного осадконакопления, то оно способствует повышению УМО, однако его величина для масштабов времени не превышающих нескольких десятков лет, является пренебрежимо малой [1,2]. Таким образом, изменения уровня Мирового океана на современном этапе обусловлены суммой эвстатических и стерических факторов.

Из эвстатических факторов очевидно, наибольшее влияние на УМО оказывают испарение и осадки [2]. В работах [3,4] уже были рассчитаны ряды по осадкам и испарению практически для всего Мирового океана (МО), но длина их была ограничена 2005 годом. В настоящее время появилась возможность дополнить и уточнить полученные ранее результаты. Поэтому было осуществлено новое осреднение исходных

данных по осадкам и испарению с 1980 по 2010 гг. в центры пятиградусных трапеций МО на основе архива «реанализа» [5].

Сопоставление зонально-осредненных значений испарения и осадков по данным архива CDAS с их средними оценками, полученными преимущественно климатологическими методами [6] показывает, что систематическое занижение составляет 17 – 26 % для испарения и 18 – 25 % для осадков, что соответствует ранее полученным результатам.

Для Мирового океана величина тренда за период 1980-2010 гг. для осадков составляет  $Tr = 2.6$  мм/год, а для испарения –  $Tr = 2.4$  мм/год. Очевидно, что главной причиной возникновения этих трендов является достаточно интенсивное потепление климата в рассматриваемый период времени которое характеризуется трендом в глобальной температуре воздуха равным  $Tr = 0,18$  °C  $\Delta T/10$ лет [7]. Действительно, корреляция глобальной температуры воздуха с рядами испарения и осадков для МО, составляющая соответственно  $r_{E,T} = 0.83$  и  $r_{P,T} = 0.76$ , подтверждает это.

Поскольку количество выпавших осадков над МО растет быстрее испарения, то тренд в эффективном испарении ( $E_{эф} = E - P$ ) оказывается отрицательным. Наибольшая величина его отмечается для Атлантического и Индийского океанов. Для Тихого океана тренд незначим по критерию Стьюдента. Величина тренда в межгодовом ходе эффективного испарения для МО в целом составляет  $Tr = -0.16$  мм/год. Соответственно, уменьшению эффективного испарения на 0.16 мм/год соответствует увеличение УМО на 0.16 мм/год или на 58 км<sup>3</sup>/год.

Естественно, наличие тренда во всех рядах существенно увеличивает степень временной связности рядов испарения и осадков. Так, корреляция между этими компонентами для МО составляет  $r_{E,P} = 0.94$ , а после исключения трендов  $r_{E,P} = 0.86$ . Примерно также обстоит дело с корреляцией между испарением и осадками для отдельных океанов (табл. 1). Максимальная корреляция после исключения трендовой компоненты отмечается для Индийского океана, а минимальная – для Атлантического океана. Испарение над МО наиболее тесно связано с испарением над Тихим океаном, а осадки над МО – с осадками над Индийским океаном. Наиболее обособленно во времени изменяются компоненты влагообмена над Тихим океаном. Очевидно, это обусловлено размерами океана, вследствие чего даже крупномасштабные гидрометеорологические процессы над ним имеют значительно большую степень самостоятельности, чем над другими океанами [8].

Межгодовая изменчивость испарения и осадков над отдельными океанами и МО в целом примерно одинакова и невелика, коэффициент вариации составляет  $C = 0.2 - 0.4$ . Значительно более высокой оказывается изменчивость  $E_{эф}$ , так как его средние значения существенно меньше средних значений  $E$  и  $P$ . Наибольший коэффициент вариации отмечается для Тихого океана при  $C = 0.96$ . Для МО в целом  $C = 0.10$ . Заметим, что он значительно больше коэффициента вариации притока пресных вод к МО, который по данным [9] равен  $C = 0.02$ .

Таблица 1

Распределение коэффициентов корреляции между испарением и осадками для отдельных океанов после исключения в рядах трендовой компоненты

Океан	Характеристика	Испарение над океаном			Осадки над океаном		
		Атлантический	Индийский	Тихий	Атлантический	Индийский	Тихий
Атлантический	Испарение	1.00	0.59	0.16	0.73	0.53	-0.11
	Осадки	0.73	0.65	0.23	1.00	0.69	-0.04
Индийский	Испарение	0.59	1.00	0.13	0.65	0.86	0.07
	Осадки	0.53	0.86	0.30	0.69	1.00	0.09
Тихий	Испарение	0.16	0.13	1.00	0.23	0.30	0.75
	Осадки	-0.11	0.07	0.75	-0.04	0.09	1.00
Мировой	Испарение	0.70	0.70	0.74	0.67	0.73	0.46
	Осадки	0.40	0.64	0.72	0.61	0.73	0.70

Если же рассматривать межгодовую изменчивость компонентов водного баланса в локальных районах океана, то можно отметить следующее. Заметное влияние на уровень океана приток пресных вод оказывает только в устьях крупных рек. Влияние айсбергового стока на уровень практически несущественно, поскольку таяние льда происходит постепенно. С учетом весьма медленных изменений стерического компонента, естественно полагать, что влияние компонентов вертикального влагообмена океана с атмосферой на межгодовые колебания УМО является значительным. В связи с этим представляет интерес выявление пространственной связности изменений уровня  $\Delta h_M$  со значениями  $E_{эф}$  в узлах сеточной области Мирового океана. Поскольку в нашем распоряжении были только средние годовые оценки УМО, то значения  $\Delta h_M$  определялись по центральным разностям:

$$\Delta h_{Mi} = \frac{h_{M(i+1)} - h_{M(i-1)}}{2}, \tag{2}$$

где  $h_{M(i+1)}$ ,  $h_{M(i-1)}$  – значения УМО в  $i+1$  и  $i-1$  годы соответственно.

Оценка пространственной связности осуществлялась на основе карт изокоррелят за промежуток времени с 1980 по 2009 г. Отчетливо выявляются хорошо выраженные локализованные очаги значимой связи между  $\Delta h_M$  и  $E-P$ . При этом зонам преобладания осадков над испарением, как правило, соответствует положительная корреляция, а зонам преобладания испарения над осадками, наоборот, отрицательная корреляция, что полностью отвечает физической сути связи. Максимальная корреляция при  $r_{\Delta h, E-P} = -0.64$  наблюдается в Тихом океане вблизи Гавайских островов

в точке с координатами  $\phi = 2,5$  ю.ш.,  $\lambda = 162,5$  з.д. Кроме того, наиболее значимые очаги положительной корреляции отмечаются также в Тихом океане – в области Алеутской депрессии и в районе действия Антарктического циркумполярного течения, а очаги отрицательной корреляции – в субтропическом районах Индийского океана восточнее о. Мадагаскар.

Эти результаты свидетельствуют о возможности построения линейной статистической модели  $\Delta h_{\text{М}}$  со значениями эффективного испарения в узлах сеточной области МО. Но поскольку число узлов значимой корреляции весьма велико и составляет 1529, то возникают вычислительные сложности при реализации модели пошаговой модели множественной регрессии. Поэтому вначале строились модели для каждого океана и отбирались наиболее значимые предикторы. В результате число предикторов было сокращено до 294. Затем методом включения переменных была построена обобщенная регрессионная модель, которая имеет очень высокую скорость сходимости. На 20-м шаге коэффициент детерминации  $R^2$  практически равен 1, стандартная ошибка модели равна нулю, причем все коэффициенты регрессии значимы на всех шагах по критерию Стьюдента. Принимая во внимание, что данная модель полностью описывает возможные ошибки функции отклика, то имеет смысл ограничиться ее анализом, например, только до 10 шага

$$\Delta h_{\text{М}} = a_0 + a_1 E_{\text{эф1}} + a_2 E_{\text{эф2}} + \dots + a_{10} E_{\text{эф10}}. \quad (3)$$

Параметры этой модели для некоторых шагов приведены в таблице 4. Нетрудно видеть, что уже на 10-м шаге стандартная ошибка становится вполне приемлемой с практической точки зрения, ибо она меньше 1 мм/год. На рисунке 1 дается распределение точек (узлов с оценками  $E-P$ ) по акватории МО с номерами, соответствующими их включению в модель (3). Отметим, что точки размещаются относительно равномерно по акватории Мирового океана за исключением Атлантического океана, причем в зоне АЦТ находится сразу три точки.

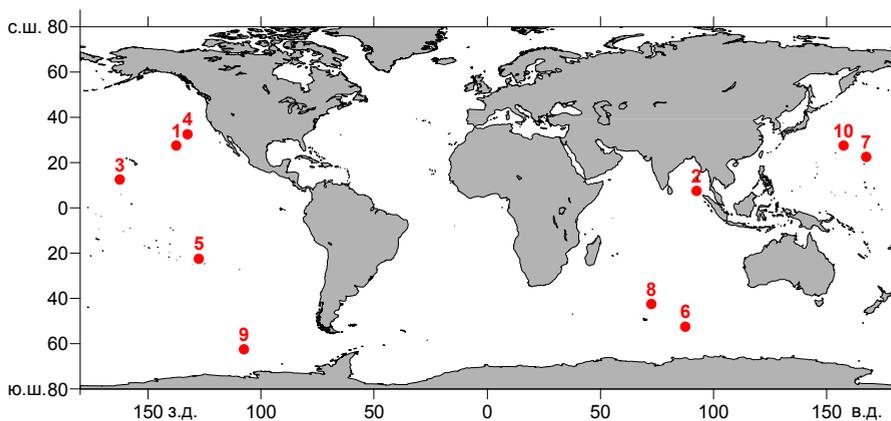


Рис. 1 — Распределение точек с эффективным испарением по акватории МО с номерами, соответствующими их включению в модель (3)

С помощью данной модели нетрудно вычислить оценки  $\Delta h_M$ , а затем и значения среднего годового УМО как  $h_{M(i+1)} = h_{M(i-1)} + 2\Delta h_{M_i}$ . Сравнение вычисленных для различных вариантов модели значений  $h_M$  с их фактическими значениями для расчетного 2008 года показывает очень малое расхождение для всех шагов модели, которое составляет менее 1 мм (таблица 2.)

Таблица 2

Оценки параметров модели (3) и линейного тренда УМО за период с 1981 по 2009 г.

Шаг модели	Коэффициент детерминации, R2	Стандартная ошибка модели, мм/год	Параметры линейного тренда УМО за 1981-2009 гг.		Расхождение вычисленного и фактического значения УМО за 2008 год, мм/год
			R2	Tr, мм/год	
3	0.64	3.2	0.82	1.97	0.26
10	0.98	0.78	0.80	2.00	0.02
12	0.99	0.62	0.81	1.98	0.56

Использование независимых значений  $E_{эф}$  за период с 2010 по 2011 годы позволило рассчитать значения УМО до 2011 года. Как видно из рис. 2, десятый и двенадцатый варианты модели дают очень близкие оценки УМО, в то время как третий шаг модели их несколько занижает. Об этом свидетельствует и более низкая оценка линейного тренда, равная  $Tr = 1.97$  мм/год. Узлы со значениями эффективного испарения и соответствующие им коэффициенты в модели (3), приводятся в таблице 3.

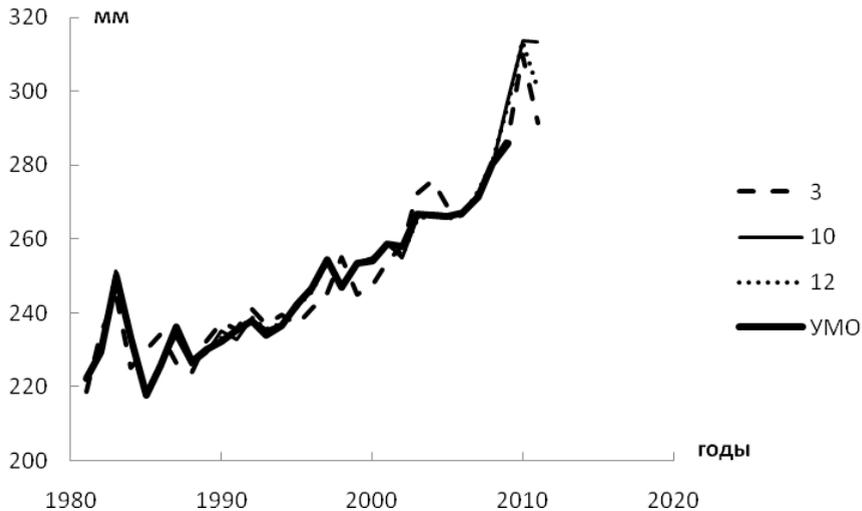


Рис. 2 — Изменения УМО за период с 1981 по 2011 г., рассчитанные по различным вариантам модели (3) по данным об эффективном испарении с поверхности океанов

Как следует из табл. 2, линейный тренд за период с 1981 по 2009 г. составил 2.0 мм/год, а по данным инструментальным наблюдений – 1.93 мм/год. Но поскольку

ку в последующие 2 года наблюдался резкий рост УМО, то и тренд тоже увеличился. Для статистической модели за период 1993-2010 гг. он составил 3.47 мм/год, что близко оценке тренда по альтиметрическим данным равным 3.26 мм/год [10]. Такое хорошее соответствие подтверждает достоверность полученных результатов и свидетельствует о возможности расчета изменений УМО по данным осадков и испарения в реперных точках Мирового океана.

Таблица 3

**Оценки коэффициентов и координаты узлов значений эффективного испарения в модели (3)**

Номер станции Свободный член	Оценка коэффициента 38.20	Широта	Долгота
1	0.07	27.5 с.ш.	137.5 з.д.
2	0.10	7.5 с.ш.	92.5 в.д.
3	- 0.09	12.5 с.ш.	162.5 з.д.
4	- 0.15	32.5 с.ш.	132.5 з.д.
5	0.06	22.5 ю.ш.	127.5 з.д.
6	0.43	52.5 ю.ш.	87.5 в.д.
7	0.10	22.5 с.ш.	167.5 в.д.
8	- 0.12	42.5 ю.ш.	72.5 в.д.
9	0.17	62.5 ю.ш.	107.5 з.д.
10	- 0.04	27.5 с.ш.	157.5 в.д.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П1223 от 07 июня 2010 г.) по направлению «Океанология».

### **Литература**

1. Малинин В.Н. О современном состоянии проблемы изменчивости вод гидросферы. – Ученые Записки РГГМУ, 2005, №1. с.54-75.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) WG1 Third Assessment Report. Chapter 11. Changes in Sea Level. (Editors V.C.Douglas, A.Ramirez), 2000, 76 p.
3. В.Н. Малинин, О.И. Шевчук. Эвстатические колебания уровня Мирового океана в современных климатических условиях // Изв. Рус. геогр. общества. 2008. Т.140. Вып.4. С. 20-30.
4. Клиге Р.К., Малинин В.Н., Шевчук О.И. Колебания уровня Мирового океана в XX столетии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. №1. С. 7-14
5. Kalnay, E. et al., 1996: The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project». Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-471.
6. Малинин В.Н. Влагообмен в системе океан-атмосфера. – СПб, Гидрометеиздат, 1994. – 198 с
7. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007 // Ed. by Bernstein L. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 940 p
8. Малинин В.Н. Изменчивость глобального водообмена в условиях меняющегося климата // Водные ресурсы. 2009, Т. 36, №1, с.1-14
9. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 638 с
10. Sea Level Change // University of Colorado at Boulder. URL: <http://sealevel.colorado.edu>

*О.П. Боровская, С.П. Смышляев, Т.В. Суходолов*

## **АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ, СПОСОБСТВУЮЩИХ УВЕЛИЧЕНИЮ УРОВНЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

*О.Р. Borovskaya, S.P. Smyshlyayev, T.V. Sukhodolov*

## **CHEMICAL LIFETIME ESTIMATIONS FOR ATMOSPHERIC ANTHROPOGENIC SPECIES**

*Предлагается алгоритм для оценки условий в атмосфере, в результате которых повышается риск химического загрязнения окружающей среды. Основу алгоритма составляет сравнение химических времен жизни токсичных газов с постоянными времени переноса атмосферными упорядоченными и хаотичными потоками.*

*Ключевые слова: временные масштабы, время жизни, химические реакции, уравнение баланса химической примеси*

*An algorithm for atmospheric conditions of the potential environmental pollution assessment is proposed. The algorithm is based on the comparison of the time scale constant for the chemical processes (chemical lifetimes) and time scales for atmospheric resolved and eddy mass transport .*

*Key words: time scale, atmospheric lifetime, chemical reactions, species continuity equation*

Попадающие в атмосферу химически активные примеси могут накапливаться в месте выбросов, если локальные метеорологические условия этому способствуют [1], или быстро разрушаться химическими процессами также в местах выбросов, если химическая ситуация в регионе этому способствует [2]. С другой стороны, эти химически активные примеси могут рассеиваться атмосферными потоками в горизонтальном направлении, или подниматься вверх в атмосферу, где они не представляют локальной токсической опасности, но могут влиять на химический и радиационный балансы и, следовательно, циркуляцию атмосферы [3]. Кроме того, атмосферный перенос может приводить и к накоплению химически опасных примесей в зонах, где отсутствуют локальные выбросы, но происходит конвергенция атмосферных потоков [4].

Исследование атмосферных условий, способствующих накоплению химически опасных примесей геосферы давно признается важной экологической задачей и проводится как экологическими, так и исследовательскими организациями [5]. Эти ис-

следования, как правило, направлены на изучение роли отдельных конкретных метеорологических явлений, способствующих ухудшению экологической ситуации [6]. Однако, для комплексной оценки условий, способствующих увеличению уровня химической загрязненности природной среды полезно иметь алгоритм, позволяющий по единым критериям сравнивать роль различных условий в формировании опасной токсичной ситуации как в отдельных регионах, так и в других районах. В настоящей работе подобный алгоритм предлагается на основе сравнения постоянных временных масштабов в уравнении баланса химически активной примеси геосферы.

Уравнение баланса химически активной примеси в геосфере представляет собой уравнение в частных производных, т.к. в нем содержатся производные по времени и пространству [7]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + \frac{\partial(wN)}{\partial z} = \sum_i R_{N,i} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[ M(D_x + K_x) \frac{\partial N/M}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( M(D_y + K_y) \frac{\partial N/M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( M(D_z + K_z) \frac{\partial N/M}{\partial z} \right),$$

где  $N$  — концентрация рассматриваемого газа;  $u, v, w$  — скорости ветра в направлении  $x, y, z$ , соответственно;  $M$  — концентрация воздуха;  $D_x, D_y, D_z$  — коэффициенты диффузии по пространственным направлениям;  $K_x, K_y, K_z$  — коэффициенты турбулентности.

Первое слагаемое в правой части представляет собой сумму скоростей химической изменчивости концентрации рассматриваемой примеси геосферы. Оно имеет вид [8]:

$$\sum_i R_{N,i} = \sum_j k_j N_{j,1} N_{j,2} + \sum_l J_l N_l - \left( \sum_m k_m N_m + J_N + k_T + k_a \right) N.$$

Первое слагаемое в правой части данного уравнения описывает продукцию за счет химических реакций второго порядка, а второе слагаемое — продукцию за счет химических реакций первого порядка. Слагаемые в скобках, взятые с отрицательным знаком, характеризуют химическое разрушение примесей геосферы в результате химического взаимодействия с другими составляющими геосферы, термического разпада, фотодиссоциации и фазовых переходов в геосфере [9].

Это слагаемое, во-первых, приводит к необходимости решать не одно уравнение для каждой примеси, а систему уравнений для всех примесей из-за связи между концентрациями разных газов, а во-вторых, придает этой системе уравнений баланса газовых примесей нелинейность за счет перемножения рассчитываемых концентраций.

Таким образом, стоит задача решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial N_j}{\partial t} + \frac{\partial(uN_j)}{\partial x} + \frac{\partial(vN_j)}{\partial y} + \frac{\partial(wN_j)}{\partial z} = \sum_i R_{N_j,i} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[ M(D_x + K_x) \frac{\partial N_j/M}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} ( ) + \frac{\partial}{\partial z} ( ), \quad j = 1, 2, \dots, L$$

где  $L$  — количество рассматриваемых примесей, определяемое поставленной задачей.

В основе метода оценки условий, способствующих увеличению уровня загрязненности природной среды, лежит сравнение химических времен жизни с постоянными времени атмосферного трансграничного переноса и времени выведения химически активных примесей из разных частей геосферы. Для осуществления подобного сравнения используется метод масштабов на основе оценки значимости слагаемых разных членов уравнения баланса химически активной примеси в геосфере.

Если переписать уравнение баланса химически активной примеси геосферы в виде уравнения эволюции:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \sum_i R_{N,i} - \frac{\partial(uN)}{\partial x} - \frac{\partial(vN)}{\partial y} - \frac{\partial(wN)}{\partial z} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[ M(D_x + K_x) \frac{\partial N/M}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( M(D_y + K_y) \frac{\partial N/M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( M(D_z + K_z) \frac{\partial N/M}{\partial z} \right),$$

то каждое слагаемое в правой части показывает вклад в тенденцию изменения химически активной примеси геосферы, стоящую в левой части. Размерность тенденции представляет собой размерность скорости изменения концентрации, т.е. молекул/ (см<sup>3</sup>с). Увеличение уровня загрязненности природной среды будет происходить, если при рассмотрении уравнения эволюции для токсичной химически активной примеси геосферы тенденция будет положительная.

Знак тенденции для токсичной примеси определяется балансом слагаемых в правой части уравнения эволюции. Первое слагаемое представляет собой скорость локального химического изменения содержания химически активной примеси геосферы. Ее масштабной характеристикой является химическое время жизни. При этом химическое время жизни является характеристикой, относящейся к оценке скорости разрушения химически активной примеси геосферы. Между тем, аналогичную характеристику можно использовать и для оценки времени увеличения концентраций токсичных примесей геосферы до опасных значений.

Химическое время жизни оценивается по отношению концентрации химически активной примеси геосферы к скорости ее химического разрушения. При этом в связи с тем, что в соответствии с принципами химической кинетики скорость разрушения конкретной примеси пропорциональна ее концентрации, значение концентрации присутствовало и в числителе и в знаменателе. В результате этого, после сокращения значений концентрации в числителе и знаменателе величина химического времени не зависела от концентрации рассматриваемого газа. При расчете постоянной времени нарастания концентрации токсичной химически активной примеси геосферы нужно осуществлять процедуру, аналогичную вычислению химического времени жизни, только не для скорости разрушения, а для скорости образования примеси, т.е. делить концентрацию примеси на скорость ее продукции:

$$\tau_{p,N} = \frac{N}{\sum_j k_j N_{j,1} N_{j,2} + \sum_i J_i N_i}.$$

При этом в отличие от вычисления химического времени жизни, скорость продукции в знаменателе не зависит от концентрации исследуемого токсичного химиче-

ски активного газа геосферы. В результате, концентрация рассматриваемой примеси геосферы в числителе не сокращается и должна задаваться при вычислении постоянной времени нарастания концентрации токсичной примеси.

В связи с тем, что опасные значения концентраций токсичных составляющих геосферы контролируются экологическими органами путем задания предельно допустимых концентраций (ПДК), для оценки условий, способствующих увеличению уровня химической загрязненности окружающей среды целесообразно использовать значения ПДК в числителе данной формулы для вычисления времени нарастания концентраций примесей до опасных значений. Таким образом, разработанная в настоящем проекте модель эволюции химически активных примесей геосферы используется для вычисления скоростей продукции и разрушения, которые стоят в знаменателе формул для вычисления времени жизни и времени нарастания концентрации, а данные о ПДК только для вычисления времени нарастания. При этом для оценки условий, способствующих увеличению уровня химической загрязненности природной среды, нужно рассчитывать как время жизни, так и время нарастания концентрации, т.к. фактическая роль химических процессов в геосфере в уровне загрязнения оценивается по разности времени жизни и времени нарастания. Если время жизни больше, чем время нарастания, то будет происходить ухудшение экологической обстановки в геосфере, а если время нарастания больше, чем время жизни, то означает, что химически активные токсичные примеси геосферы разрушаются быстрее, чем образуются и нарастания уровня загрязненности не происходит.

Остальные слагаемые в правой части уравнения эволюции, которые описывают влияние переноса массы горизонтальными и вертикальными упорядоченными, диффузионными и турбулентными потоками в геосфере, также оказывают влияние на знак и величину тенденции изменчивости (эволюции) содержания токсичной химически активной примеси в геосфере. Второе, третье и четвертое слагаемые описывают дивергенцию (расходимость) потока примеси геосферы за счет упорядоченного переноса массы потоками и течениями в геосфере. Если дивергенция положительна, то содержание токсичной примеси рассеивается по геосфере и условия химического загрязнения не ухудшаются. Это описывается отрицательным знаком слагаемых дивергенции в уравнении эволюции. Если дивергенция упорядоченного потока отрицательна, это означает, что происходит конвергенция потока, т.е. скопление химически активной токсичной примеси в зоне конвергенции. В этом случае увеличивается уровень химической загрязненности природной среды в данном районе.

Для оценки вклада дивергенции упорядоченного потока в тенденцию изменчивости химически активной токсичной примеси геосферы необходимо оценить постоянную времени этого процесса, определить происходит конвергенция или дивергенция и сравнить постоянные времени дивергенции с постоянными времени химических процессов, т.е. временем жизни и времени накопления. Т.к. в этих слагаемых в уравнениях эволюции стоят производные по пространственным переменным, для оценки временных постоянных необходимо задать пространственные масштабы изменчивости. Таким образом постоянная времени упорядоченного (адвективного) переноса может быть оценена по формуле:

$$\tau_{Ad,N} = \frac{N}{div(vN)}$$

Три последних слагаемых в уравнении эволюции описывают тенденцию изменчивости концентрации химически активной токсичной примеси геосферы за счет турбулентного и диффузионного переноса в геосфере. Этот вид переноса определяется хаотичным движением молекул (диффузия) или объемов массы (турбулентность) в геосфере. Направление действия этих процессов происходит в сторону выравнивания концентраций примеси в соседних точках геосферы. Действие потока происходит против градиента изменчивости концентрации, т.е. от больших концентраций в сторону меньших концентраций, в чем и заключается процесс выравнивания. Скорость выравнивания определяется коэффициентами диффузии и турбулентности, которые задаются по экспериментальным данным и параметрическим расчетам эффективности процессов подсеточного масштаба.

Для вычисления постоянной времени турбулентных и диффузионных процессов используются данные о ПДК, коэффициентах турбулентности и диффузии и пространственных масштабах аналогично заданным для расчета постоянной времени адвективных процессов:

$$\tau_{Ad,N} = \frac{N}{\frac{\partial}{\partial x} \left[ M(K_x + D_x) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{N}{M} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ M(K_y + D_y) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N}{M} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ M(K_z + D_z) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{N}{M} \right) \right]}$$

Таким образом, методика модельной оценки условий, способствующих увеличению уровня загрязненности природной среды, заключается по последовательном выполнении следующих шагов:

- а) Оценка химического времени жизни рассматриваемой токсичной химически активной примеси геосферы;
- б) Задание предельно допустимых концентраций рассматриваемой примеси;
- в) Вычисление постоянной времени химического накопления рассматриваемой примеси;
- г) Задание пространственных масштабов изменчивости данной химической примеси;
- д) Вычисление постоянной времени дивергенции упорядоченного потока рассматриваемой примеси в геосфере;
- е) Вычисление постоянной времени диффузионного и турбулентного переноса данной химически активной примеси;
- ж) Сравнение времен жизни всех процессов влияющих на тенденцию изменчивости рассматриваемой химической примеси геосферы и выделение доминирующих эффектов;
- з) Выделение процессов влияющих на увеличение тенденции (имеющих положительный знак в правой части уравнения эволюции);
- и) Анализ причин изменчивости этих процессов и оценка вероятности увеличения их положительного вклада в тенденцию изменчивости химически активной примеси геосферы;

- к) Выдача рекомендаций для экологических органов по увеличению внимания к процессам вносящим вклад в увеличение тенденции изменчивости концентраций химически активных токсичных примесей геосферы.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П734 от 20 мая 2010 г.), мероприятие 1.2.1 по направлению «Геохимия».

### Литература

1. *Jacobson M.Z.* Fundamental of atmospheric modeling. – University Press, Cambridge, 1999. – 656 pp.
2. *Brasseur G.* Atmospheric Chemistry and Global Change [Текст]/ G. Brasseur, J. Orlando, G. Tyndall, Oxford University Press, 1999
3. *Seinfeld, J.H.* Atmospheric Chemistry and Physics / J.H. Seinfeld, S.N. Pandis // Wiley Interscience. 1998. P. 22-26.
4. *Jacob, D.J.* Introduction to Atmospheric Chemistry / D.J. Jacob // Princeton Univ. Press. 1999. P.23-24.
5. *Меньшиков В.В., Швыряев А.А.* Опасные химические объекты и техногенный риск: Учебное пособие. М.: Изд-во Химия, фак. Моск. ун-та, 2003.
6. *Андруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Лице П.* Введение в химию окружающей среды. Пер с англ. М.: Мир, 1999.
7. *Эммануэль А.Б., Кнорре Р.Б.* Основы химической кинетики. Наука. 1968. - 413 с.
8. *Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyaev S.P.* Parameterization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103. № D17. P. 22047-22062.
9. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т.40. № 2. С. 211-222.

*Я.А. Гонцов, С.П. Смышляев, А.Р. Курганский, С.В. Мостаманди*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ РЕГИОНОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

*Ya.A. Gontsov, S.P. Smyshlyayev, A.R. Kurgansky, S.V. Mostamandi*

## CHEMICAL PROCESSES MODELING IN THE LOW ATMOSPHERE OF THE RUSSIAN REGIONS

*Боксовая фотохимическая модель используется для моделирования химических процессов в приземном слое атмосферы. На основании задания потоков азотных и углеводородных составляющих в атмосферу для разных регионов Российской Федерации проверяется влияние соотношения между потоками на формирование вторичных загрязнителей нижней атмосферы, таких как озон. По результатам расчетов оценивается значимость азотных и углеводородных химических составляющих для разных условий антропогенной нагрузки атмосферы.*

*Ключевые слова: химические реакции, антропогенные выбросы, азотные газы, углеводороды*

*A box photochemical model is used to model the chemical processes in the atmospheric boundary layer. Based on the specified surface fluxes of the nitrogen and hydrocarbon gases for the different regions of Russia the role of ratio between these fluxes is tested for the secondary gases like ozone formation. Significance of the nitrogen and hydrocarbons is discussed.*

*Key words: chemical reactions, anthropogenic emissions, nitrogen gases, hydrocarbons*

Газовые выбросы в нижнюю атмосферу могут, с одной стороны, приводить к ухудшению экологической обстановки в местах выбросов за счет собственных токсичных свойств [1], с другой стороны, могут способствовать формированию вторичных токсичных загрязнителей, таких как, например, озон, который, несмотря на свою защитную роль в стратосфере [2], в нижней атмосфере опасен для биологических субъектов в силу своей сильной окислительной способности [3]. В этой связи полезно представлять, в какой степени соотношение между первичными выбросами химически активных примесей геосферы в нижнюю атмосферу способствует формированию вторичных загрязнителей и, в первую очередь, озона.

Для мониторинга химических процессов в геосфере регионов Российской Федерации в настоящей работе проводились модельные численные эксперименты, в которых рассматривалось влияние химических выбросов в результате химических процессов в почве - в атмосферу. Целью проводимого мониторинга было исследовать влияние соотношения между химически активными азотными составляющими и углеводородными составляющими. Для проведения мониторинга использовалась разработанная в Российском государственном гидрометеорологическом университе-

те модель химических процессов в геосфере Земли [4]. В качестве регионов исследования были выбраны: Москва, со значительными выбросами как углеводородов, так и азотных составляющих, С-Петербург со значительными выбросами азотных составляющих и меньшими выбросами углеводородов и Новосибирск, с существенными углеводородами и, относительно, малыми выбросами азотных составляющих [5].

На рис. 1 приведено расчетное изменение суммарных окислов азота в Москве на четвертые сутки моделирования для апреля при задании характерных для Москвы значений поверхностных потоков углеводородов и азотных составляющих.

Для Москвы характерны высокий уровень как азотных составляющих, так и углеводородов. В этих условиях первичные выбросы этих химически активных газов могут, с одной стороны привести к образованию вторичных химических загрязнителей, таких как озон.

Характерным являются очень высокие концентрации азотных составляющих, что связано, вероятно, с повышенными выбросами автотранспорта. В суточном ходе отмечается повышение к концу дня (82–86 часы) и уменьшение ночью, когда снижается выброс окислов азота автотранспортом. К концу ночи, опять, отмечается повышение содержания азотных составляющих, связанное, в этот раз, с процессами обмена между почвой и атмосферой и переходом азотных химических примесей из жидкой фазы в газообразную.

На рис. 2 приведено изменение двуокиси азота, которая среди азотных составляющих является важнейшей для формирования вторичных химических загрязнителей, таких как озон. Для двуокиси азота характерно уменьшение концентрации в дневные часы, связанное с ее диссоциацией под воздействием солнечных лучей. В ночное время происходит накопление двуокиси азота, т.к. главным стоком для нее является фотолиз. В процессе фотодиссоциации двуокиси азота происходит формирование атомарного кислорода, который рекомбинирует с молекулярным с формированием озона.

Таким образом, изменение концентрации озона, на первый взгляд, в точности должно следовать суточной изменчивости двуокиси азота и быть противоположной по фазам изменчивости. Однако, как показано на рис. 3, концентрация озона, с одной стороны, действительно имеет максимум в дневное время, однако, этот максимум сдвинут относительно минимума двуокиси азота. Кроме того, содержание озона резко падает в ночные часы.

На рис. 4 приведено изменение окиси азота, которая является, с одной стороны, основным продуктом антропогенных выбросов с поверхности, главным образом от автотранспорта, а с другой стороны, образуется в результате процессов фотолиза двуокиси азота. Как показывают результаты модельных экспериментов, окись азота меняется в противофазе с двуокисью азота и, примерно, в одной фазе с озоном. Однако максимум концентрации окиси азота наступает сразу после восхода и опережает максимум озона на 8–10 часов.

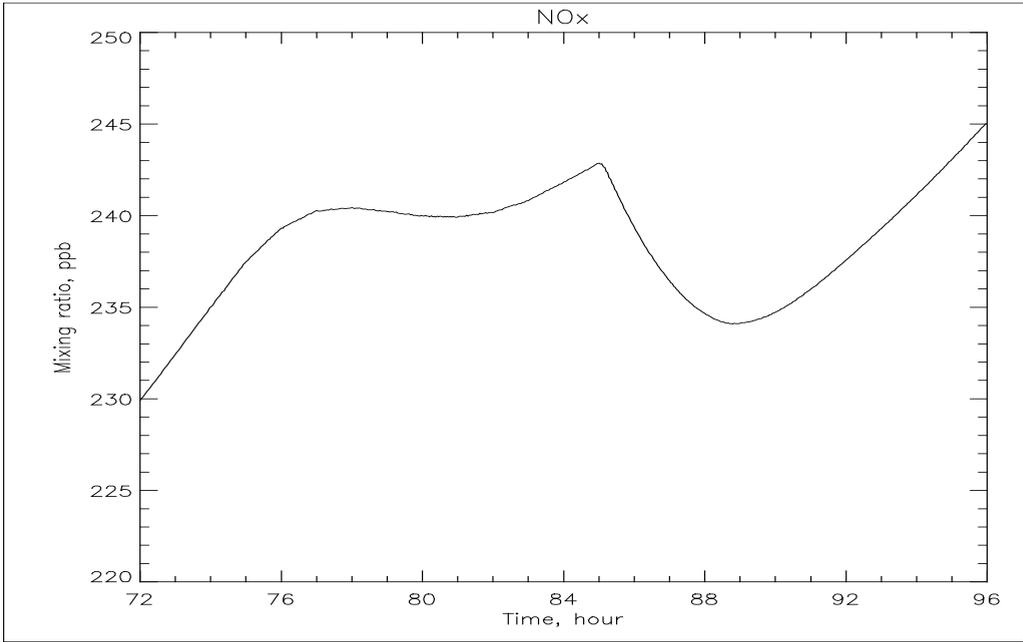


Рис. 1 – Суточное изменение концентрации азотных составляющих в апреле для Москвы

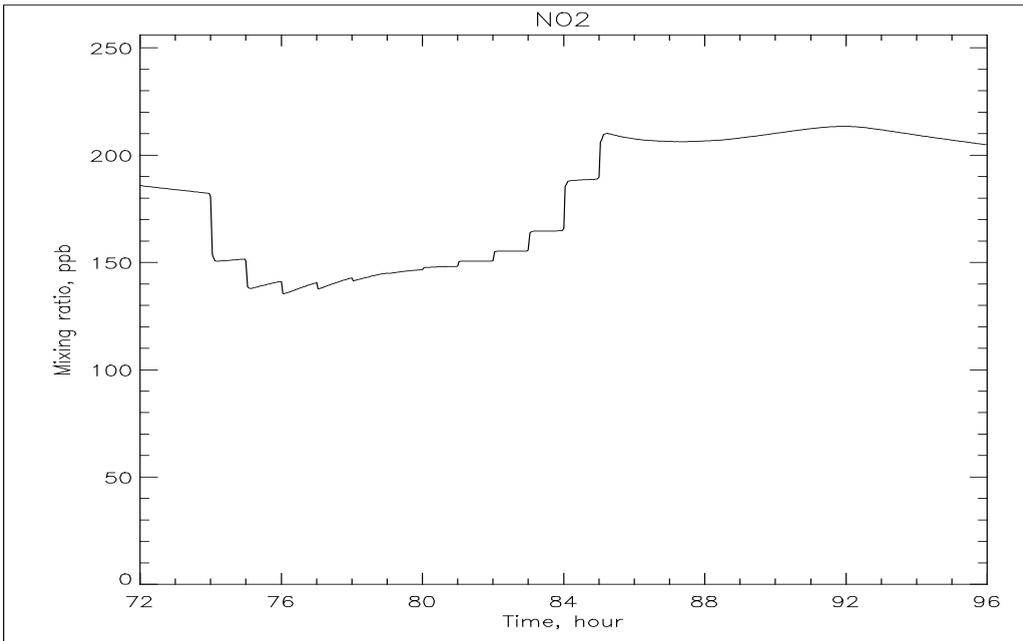


Рис. 2 – Суточное изменение концентрации двуокиси азота в среднем для Москвы

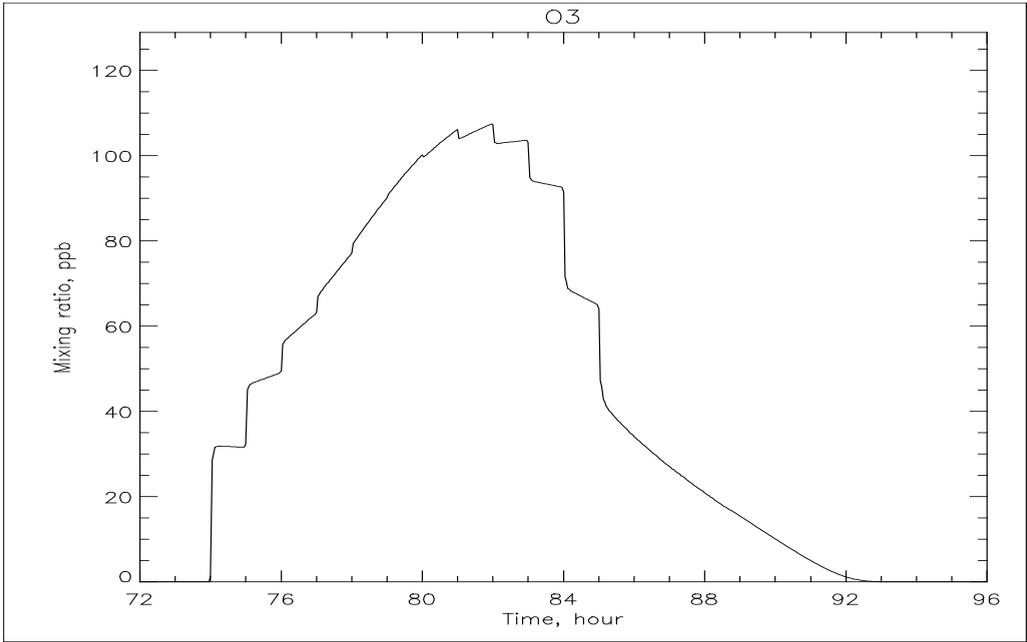


Рис. 3 – Суточное изменение концентрации озона в среднем для Москвы

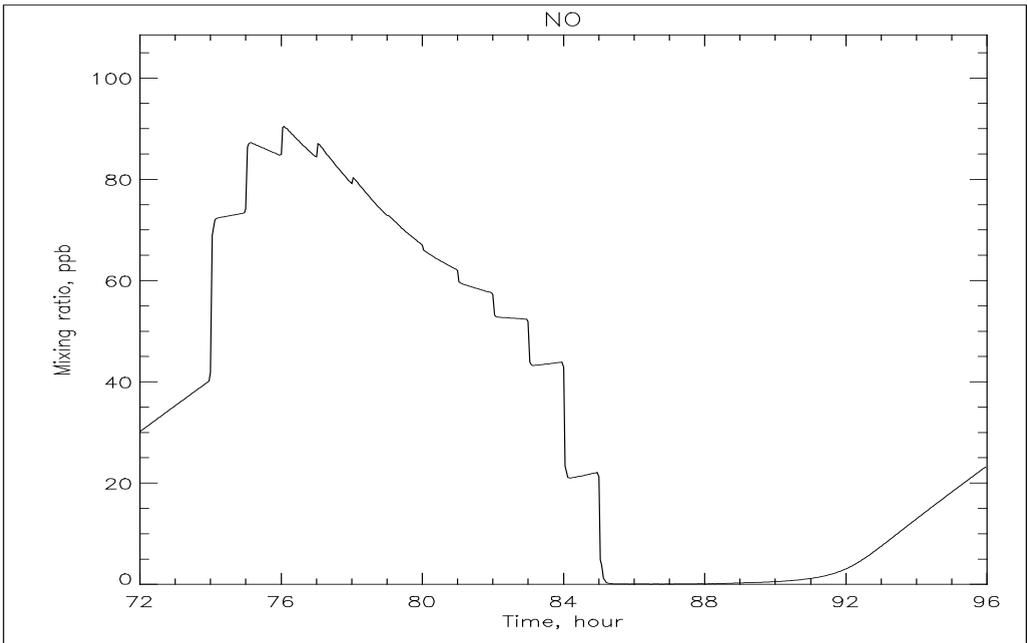


Рис. 4 – Суточное изменение концентрации окиси азота в среднем для Москвы

На рис. 5 приведено изменение концентрации паров азотной кислоты, которая, с одной стороны, является резервуаром для азотных и водородных химических составляющих в геосфере, т.к. образуется в результате химической реакции окиси азота с пергидроксидом, а с другой стороны, может менять свое агрегатное состояние и переходить из газовой в жидкую фазу, тем самым способствуя обмену химическими составляющими между разными частями геосферы.

Для С-Петербурга характерно относительно высокие значения выбросов азотных составляющих, которые, тем не менее, существенно ниже Московских значений и высокие значения выбросов углеводородов, которые сравнимы с Московскими, а иногда даже и превосходят их. Для этих условий были проведены модельные эксперименты по исследованию химических превращений в геосфере С-Петербурга.

Сравнение результатов моделирования для С-Петербурга и Москвы показывает качественные и количественные различия (сравнение с рис. 1). Абсолютные значения концентраций азотных составляющих для геосферы С-Петербурга примерно в 50 раз меньше, чем для Москвы. При этом суточная изменчивость также отличается качественным образом, с минимумом в светлое время и максимумом — в ночное время.

Изменение основного предвестника озона — двуокиси азота — в геосфере С-Петербурга (рис. 7), во-первых, по фазам следует изменчивости суммарных азотных составляющих (рис. 6), а во-вторых, сильно отличается от изменчивости двуокиси азота в геосфере Москвы (рис. 2). Этот результат показывает значимость уровня азотными загрязнениями для химии геосферы и важность особенностей обмена химическими составляющими между разными частями геосферы.

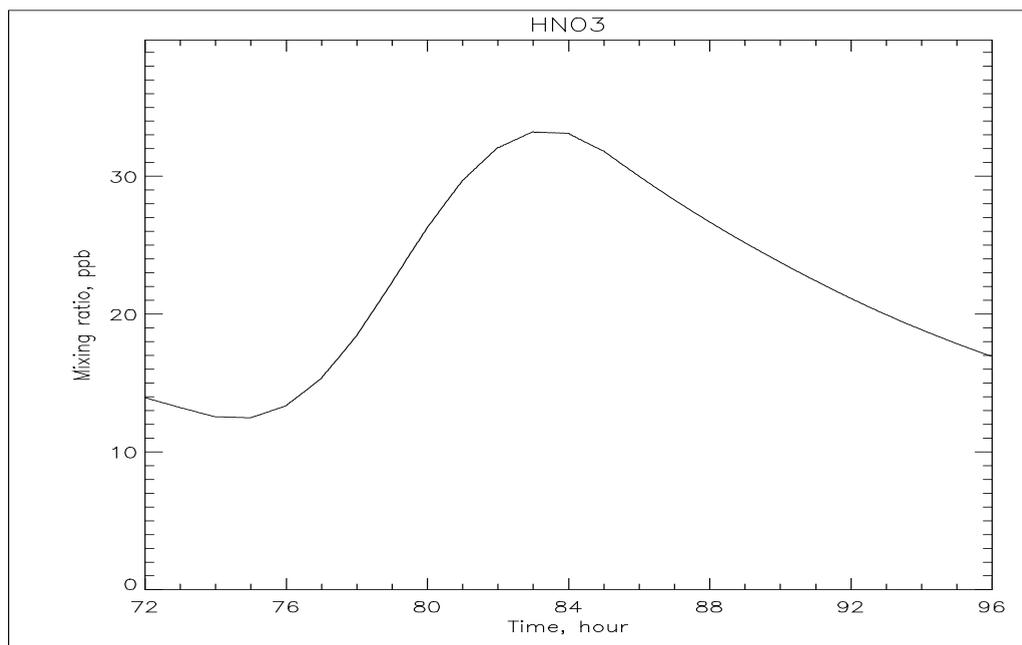


Рис. 5 — Суточное изменение концентрации паров азотной кислоты в среднем для Москвы

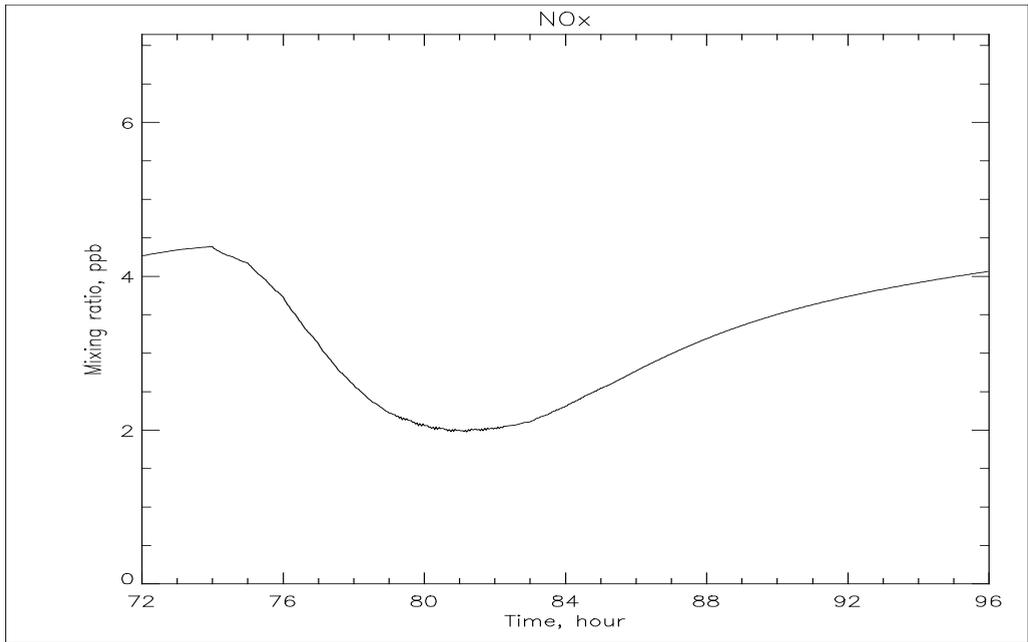


Рис. 6 – Суточное изменение концентрации азотных составляющих в геосфере С-Петербурга

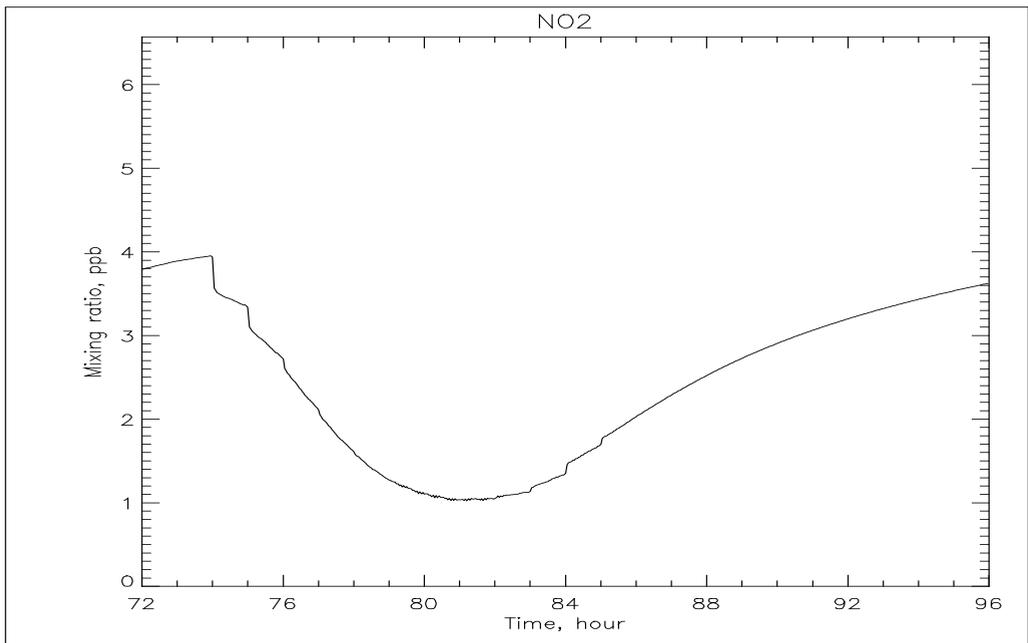


Рис. 7 – Суточное изменение концентрации двуокси азота в среднем для С-Петербурга

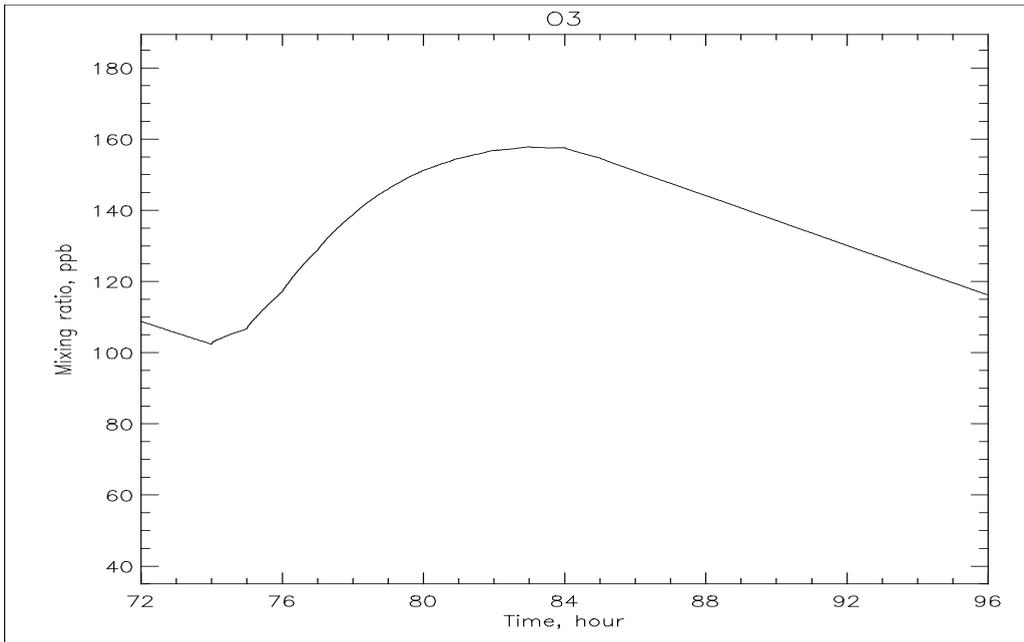


Рис. 8 – Суточное изменение концентрации озона для С-Петербурга

Изменение концентрации озона в геосфере С-Петербурга (рисунок 8) также отличается от изменчивости озона в Москве (рис. 3). При этом, если содержание азотных составляющих, в целом по С-Петербургу, существенно ниже по сравнению с Москвой, то содержание озона, наоборот, в условиях, характерных для химического состояния в геосфере С-Петербурга, выше, чем в Москве.

При этом максимальное значение концентрации озона в С-Петербурге (около 150 ppb) превышает максимальное значение для Москвы (около 110 ppb). Кроме того, максимум в С-Петербурге (почти сразу после полудня) достигается раньше чем в Москве (ближе к заходу Солнца). Наконец, в ночное время в С-Петербурге концентрации озона остаются достаточно высокими (около 100 ppb), в то время как в Москве ночью содержание озона уменьшается практически до нулевых значений.

В связи с тем, что продукция озона в геосфере критическим образом контролируется содержанием двуокси азота, а ее содержание в геосфере Москвы существенно больше, чем в геосфере С-Петербурга, продукция озона в С-Петербурге не может быть больше, чем в геосфере Москвы. С другой стороны, уменьшение содержания озона в Москве ночью практически до нуля не может определяться уменьшением продукции озона, т.к. в С-Петербурге также не производится озон в ночное время, а его концентрация остается высокой.

Таким образом, по результатам сравнения суточной изменчивости озона в геосфере Москвы и С-Петербурга можно сделать вывод о важной роли процессов разрушения озона. Это разрушение может быть как химическим в газовой фазе, т.е за счет разрушения озона в каталитических циклах с участием водородных и азотных

составляющих геосферы, так и за счет химического взаимодействия на границе разных частей геосферы, т.е. на границе атмосферы и почвы.

На рис. 9 приведено суточное изменение концентрации окиси азота, уровень которой может характеризовать разрушение озона в азотных каталитических циклах для химических условий геосферы С-Петербурга.

Результаты модельных расчетов показывают, что концентрация окиси азота не высока для существенного разрушения озона в геосфере С-Петербурга по сравнению с геосферой Москвы (рис. 4). Однако и в Москве концентрация окиси азота существенно уменьшается в вечернее и ночное время, когда происходит разрушение озона.

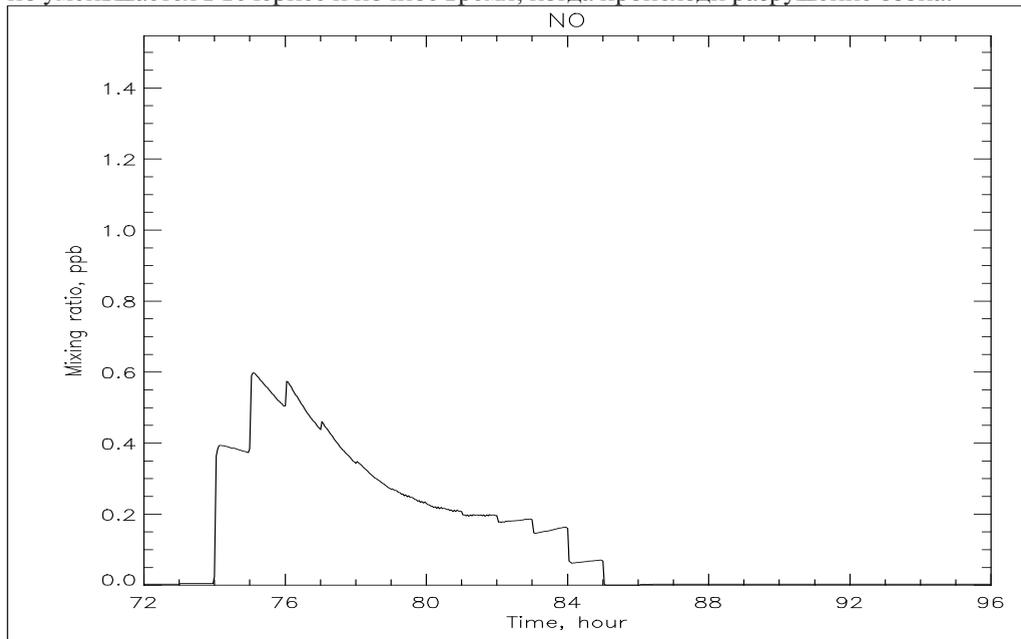


Рис. 9 – Суточное изменение концентрации окиси азота для С-Петербурга

Таким образом, можно предположить, что уменьшение концентрации озона в ночное время в Москве вряд ли связано с повышенным содержанием окислов азота и может определяться или разрушением в водородных каталитических циклах, или разрушением на поверхности.

На рис. 10 приведено изменение паров азотной кислоты в геосфере С-Петербурга. Сравнение со значениями для Москвы (рис. 5) показывает, что при сходном суточном ходе абсолютные значения концентрации  $\text{HNO}_3$  для Москвы существенно выше, что может способствовать разрушению озона на поверхности атмосферного аэрозоля, образующегося при конденсации паров азотной кислоты.

Для Новосибирска характерны малые значения выбросов окислов азота и углеводородов. При таких значениях образование вторичных химических загрязнителей в геосфере, таких как озон, должно быть прямо пропорционально содержанию как углеводородов, так и окислов азота.

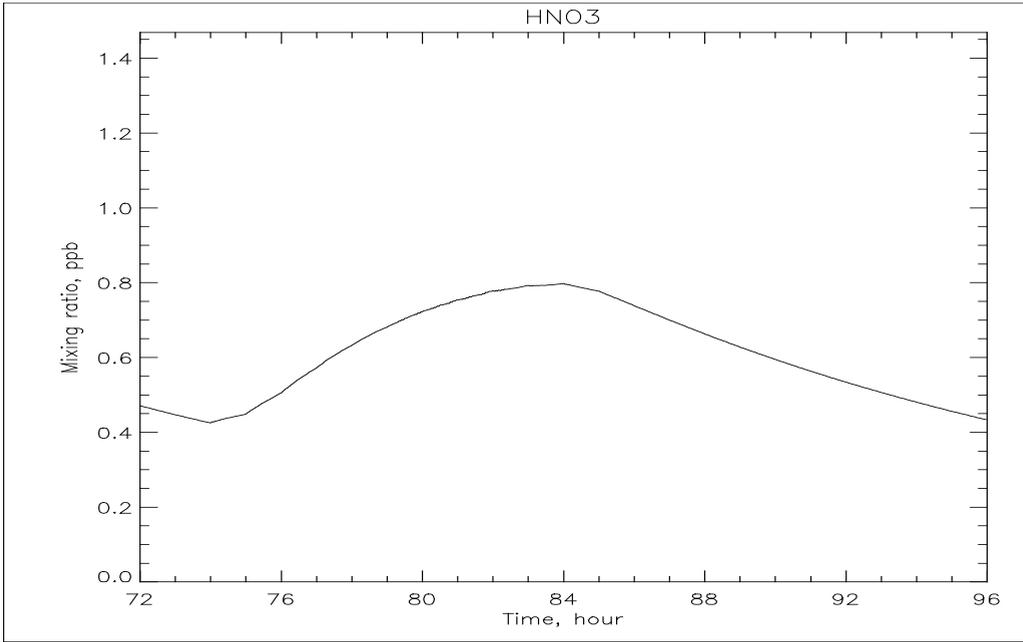


Рис. 10 – Суточное изменение концентрации паров азотной кислоты для С-Петербурга

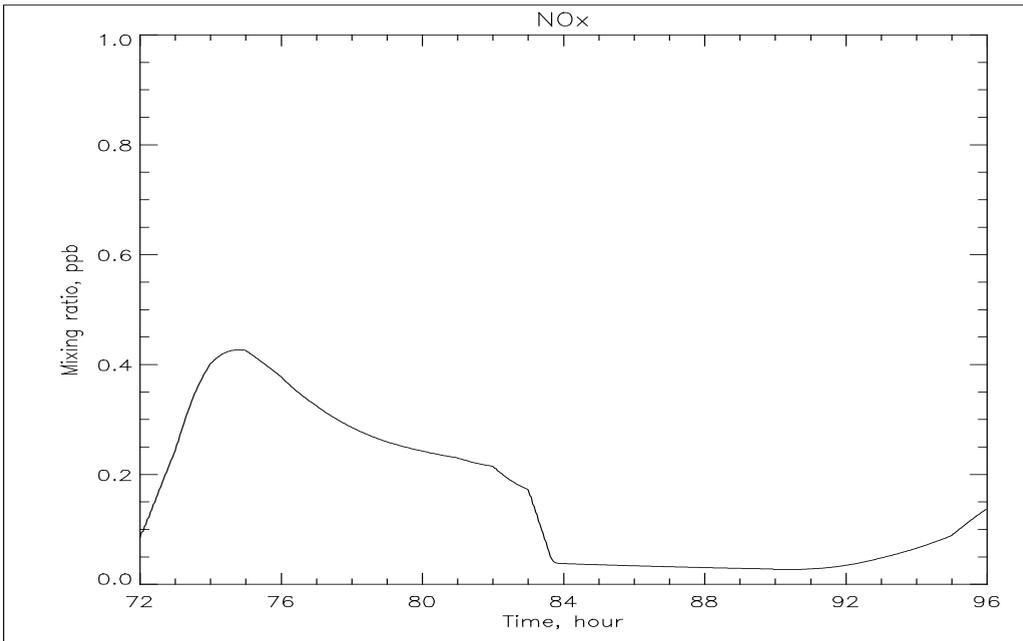


Рис. 11 – Суточное изменение концентрации азотных составляющих в геосфере Новосибирска

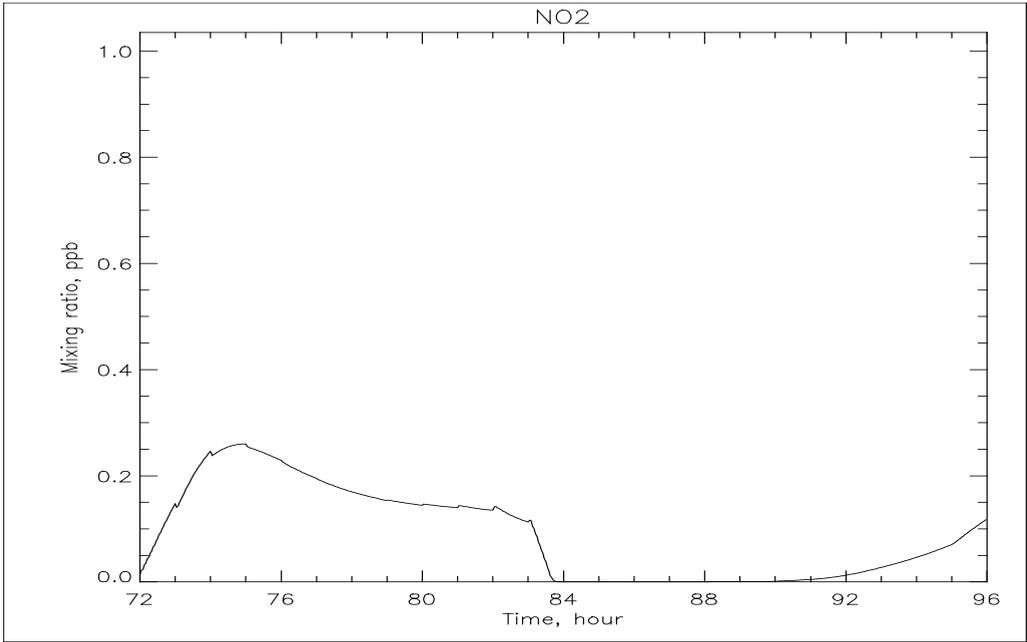


Рис. 12 – Суточное изменение концентрации двуокиси азота в геосфере Новосибирска

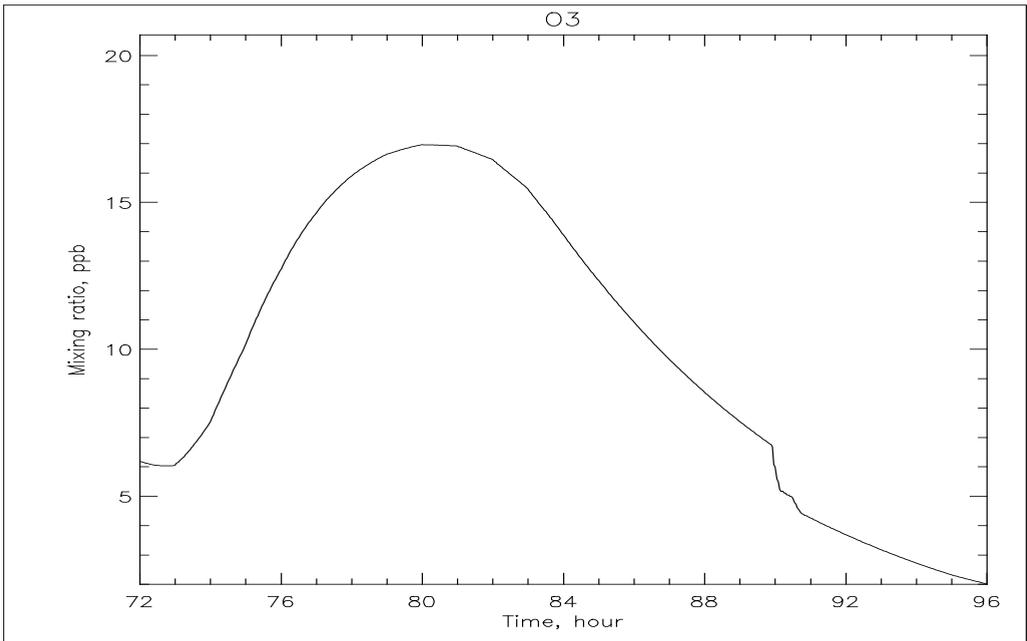


Рис. 13 – Суточное изменение концентрации озона в геосфере Новосибирска

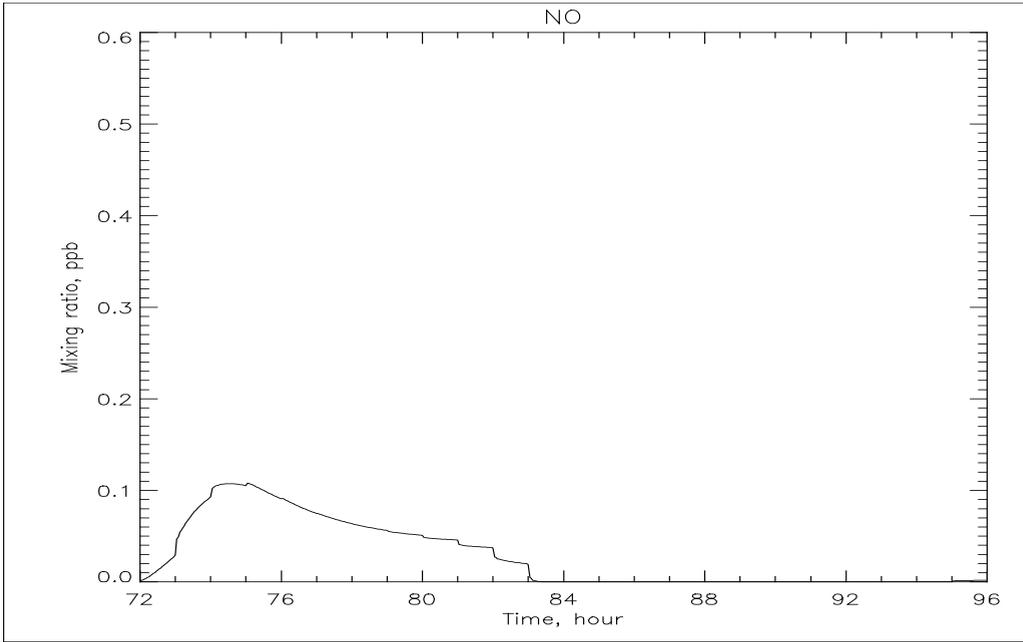


Рис. 14 – Суточное изменение концентрации окиси азота в геосфере Новосибирска

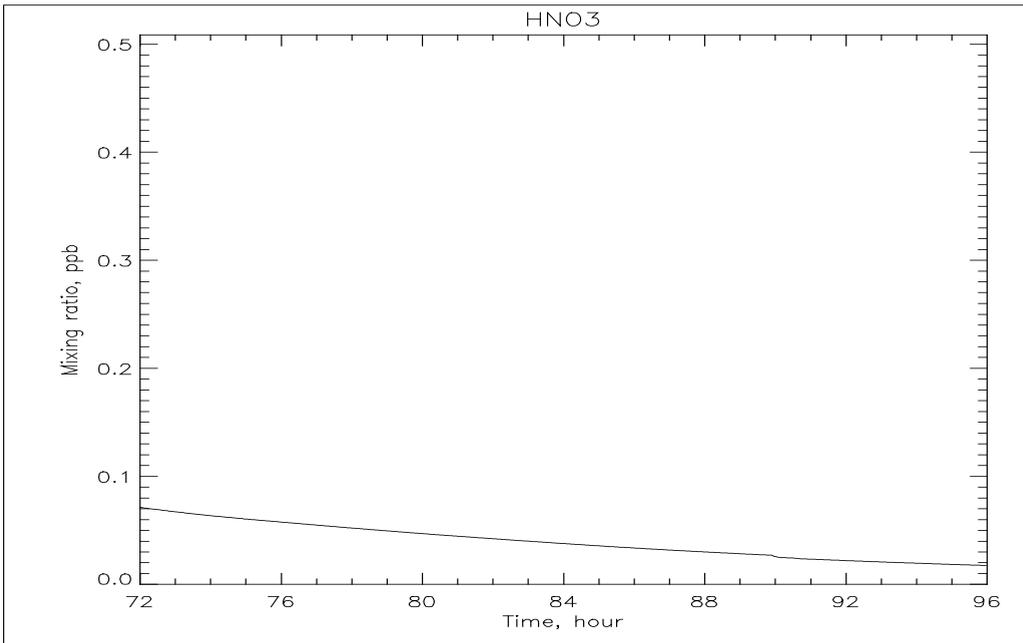


Рис. 15 – Суточное изменение концентрации паров азотной кислоты в геосфере Новосибирска

На рис. 11 показано суточное изменение содержания азотных составляющих для условий характерных для Новосибирского региона. Концентрация азотных составляющих по абсолютной величине не превышает 0.5 ррв, а в ночные часы уменьшается меньше 0.1 ррв. Уменьшение в ночные часы связано с фазовыми переходами азотных составляющих и химическим разрушением на поверхности.

Для двуокиси азота, являющейся предвестником озона, характерно также значительное изменение концентрации в течение суток с малыми абсолютными значениями (рис. 12).

Соответствующее изменение концентрации озона для условий Новосибирска приведено на рис. 13. Обращает внимание малое содержание озона, не превышающее 20 ррв, что является даже меньше среднестатистических значений 35 ррв. В суточном ходе отмечается повышение содержания в течение светлого времени и резкое падение после полудня. При этом, максимальные значения при малых уровнях загрязнения достигаются раньше чем при высоких (пример Москвы) и средних (условия С-Петербурга) уровнях загрязнения.

Изменение содержания окиси азота для региона Новосибирска (рис. 14). В дневное время в результате фотолиза двуокиси азота концентрация двуокиси азота растет, а в ночное время падает, т.к. нет атмосферного источника для ее формирования, а поверхностные потоки азотных составляющих в регионе исследования невелики.

Малые значения окислов азота в геосфере региона Новосибирска не позволяют окислам азота выступать в качестве эффективных разрушителей озона. Таким образом, разрушение озона в ночное время происходит в других каталитических циклах или при химическом взаимодействии с другими составляющими геосферы.

На рис. 15 приведено изменение содержания паров азотной кислоты, содержание которой может характеризовать подверженность газов геосферы к фазовым переходам. Следует заметить, что качественное изменение паров азотной кислоты для региона Новосибирска сильно отличается от загрязненных регионов (Москва и С-Петербург). Для региона Новосибирска  $\text{HNO}_3$  плавно и монотонно уменьшается в течение суток в отличие от загрязненных регионов.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П734 от 20 мая 2010 г.), мероприятие 1.2.1 по направлению «Геохимия».

### Литература

1. Seinfeld, J.H. Atmospheric Chemistry and Physics / J.H. Seinfeld, S.N. Pandis // Wiley Interscience. 1998. P. 22-26.
2. Jacob, D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry / D.J. Jacob // Princeton Univ. Press. 1999. P.23-24.
3. Андруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Лисе П. Введение в химию окружающей среды. Пер с англ. М.: Мир, 1999.
4. Smyshlyaev S.P., Geller M.A., Yudin V.A. Sensitivity of model assessments of high-speed civil transport effects on stratospheric ozone resulting from uncertainties in the  $\text{NO}_x$  production from lightning // Journal of Geophysical Research. 1999. V.104. No. D21, P. 26401-26417.
5. Меньшиков В.В., Швыряев А.А. Опасные химические объекты и техногенный риск: Учебное пособие. М.: Изд-во Химия, фак. Моск. ун-та, 2003.

*С.П. Смышляев, Я.А. Гонцов, Е.И. Хорева*

## ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ НАХОЖДЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ГАЗОВ

*S.P. Smyshlyayev, Ya.A. Gontsov, E.I. Horeva*

## CHEMICAL LIFETIME ESTIMATIONS FOR ATMOSPHERIC ANTHROPOGENIC SPECIES

*Боксовая фотохимическая модель используется для расчета времени жизни в атмосфере газов, имеющих источники в других частях геосферы, почве и воде. В зависимости от состава выбросов в атмосферу из других частей геосферы производятся оценки суточного хода времен жизни газов. По результатам расчетов времен атмосферной жизни делаются оценки потенциала для переноса антропогенных газов в другие части геосферы.*

*Ключевые слова: время жизни, химические реакции, антропогенные выбросы, потенциал для атмосферного переноса*

*A box photochemical model is used to estimate atmospheric lifetime for the gases with sources in the other parts of the geosphere, soil and water. Diurnal variability of the species lifetime is calculated for the different conditions, depending on the emissions content. Potential for atmospheric gases transport to the other parts of the geosphere is estimated based on the lifetime computations.*

*Key words: atmospheric lifetime, chemical reactions, anthropogenic emissions, potential for transport of atmospheric gases*

Время жизни химически активных примесей в геосфере определяет их значимость для локального качества воздуха и потенциал для трансграничного переноса в соседние области, а также вероятность их влияния на глобальные процессы за счет перемещения в верхние слои атмосферы и перемешивание по всему земному шару. Время жизни примесей геосферы определяется скоростью их химической трансформации в другие газы и физического вымывания в результате сухого осаждения на земную поверхность и фазовых переходов в жидкое или твердое состояние с последующим гравитационным осаждением. Кроме того, при расчете химического времени жизни целесообразно учитывать возможную обратимость химических реакций, когда разрушившиеся примеси могут быстро вернуться в исходное состояние в результате обратной химической реакции.

Для расчета времени нахождения химически активных примесей в геосфере используется уравнение баланса примеси в форме уравнений химической кинетики [1]

$$\frac{d\vec{N}}{dt} = \vec{R},$$

где  $\vec{N} = (N_1, N_2, \dots, N_L)$  – концентрации вычисляемых газов;  $\vec{R} = (R_1, R_2, \dots, R_L)$  – скорости их фотохимического изменения;  $L$  – число вычисляемых газов.

В соответствии с правилами химической кинетики скорости фотохимического изменения параметрически записываются в форме [2]:

$$R_j = \sum_{i,m} k_{im} N_i N_m + \sum_l J_l N_l + \sum_i k_{ai} N_i - \left( \sum_m k_{jm} N_m + J_j + k_{m,j} + k_{a,j} \right) N_j$$

$$j = 1, 2, \dots, L.$$

В правой части члены со знаком плюс описывают фотохимическую продукцию газа с номером  $j$ , а члены со знаком минус – разрушение этого же газа. Первый член в правой части отвечает за химическую продукцию данного газа, второй член – продукцию в результате фотодиссоциации, третий – гетерогенную продукцию в результате реакций на поверхности и внутри атмосферного аэрозоля. Разрушение в круглых скобках также характеризует химическое разрушение, фотодиссоциацию данного газа, его мономолекулярный распад и гетерогенное осаждение на аэрозоль.

Для вычисления химического времени жизни примеси в геосфере используются слагаемые правой части, имеющие отрицательный знак, т.е. описывающие разрушение примеси в результате химических реакций. Для оценки времени жизни необходимо разделить концентрацию рассматриваемой примеси на скорость ее разрушения:

$$\tau_{ch,j} = \frac{N_j}{\left( \sum_m k_{jm} N_m + J_j + k_{m,j} + k_{a,j} \right) N_j}.$$

При этом значение концентрации рассматриваемой примеси находится и в числителе и в знаменателе. В результате сокращения получается формула, в которой время жизни не зависит от текущей концентрации химически активной примеси геосферы:

$$\tau_{ch,j} = \frac{1}{\left( \sum_m k_{jm} N_m + J_j + k_{m,j} + k_{a,j} \right)}.$$

Это означает, что оценивается среднее время нахождения в геосфере любой молекулы анной химически активной примеси геосферы до ее разрушения химическими процессами.

Если ассоциировать время вымывания из геосферы рассматриваемой примеси с каждым из процессов ее разрушения в отдельности, то получим:

$$\tau_{ch,1} = \frac{1}{\sum_m k_{jm} N_m}, \quad \tau_{ph} = \frac{1}{J_j}, \quad \tau_m = \frac{1}{k_{m,j}}, \quad \tau_a = \frac{1}{k_{a,j}}$$

Где первое время жизни относится к химическому разрушению данной примеси геосферы, второе – к распаду за счет фотодиссоциации при поглощении квантов света, третье – к разрушению в результате термического мономолекулярного распада, а четвертое – к разрушению в результате химического взаимодействия с аэрозолями и фазовых переходов.

Если записать общее время жизни химически активной примеси геосферы через времена жизни, относящиеся к отдельным процессам ее выведения из геосферы, то получим формулу:

$$\frac{1}{\tau_{ch,N}} = \frac{1}{\tau_{ch,1}} + \frac{1}{\tau_{ph}} + \frac{1}{\tau_m} + \frac{1}{\tau_a}.$$

Таким образом, отдельные процессы выведения химически активной примеси из геосферы при совместном и одновременном действии складываются подобно электрическим сопротивлениям при параллельном подключении, что означает, что общее время жизни даже меньше, чем наименьшее из относящихся к отдельным процессам.

Для расчета химических времен жизни в разных частях геосферы использовался описанный выше алгоритм и модель влияния антропогенных газовых выбросов на химические процессы в геосфере [3]. Для инициализации модели использовались данные об инвентаризации источников химически активных примесей в разных частях геосферы [4].

В связи с тем, что скорость химической трансформации примесей геосферы может быстро меняться в течение суток в зависимости от условий освещения солнечным светом, для анализа рассматривалась суточная изменчивость времени жизни разных примесей геосферы. Разное время жизни в зависимости от времени суток может привести к разному соотношению с постоянными времени переноса массы в геосфере и, соответственно, к разному времени перемешивания химически активных примесей в разное время суток, в разных частях геосферы.

На рис. 1 представлена суточная изменчивость времени жизни угарного газа (CO), который является, с одной стороны, опасным токсичным газом, а с другой стороны, является предвестником вторичного токсичного газа - озона.

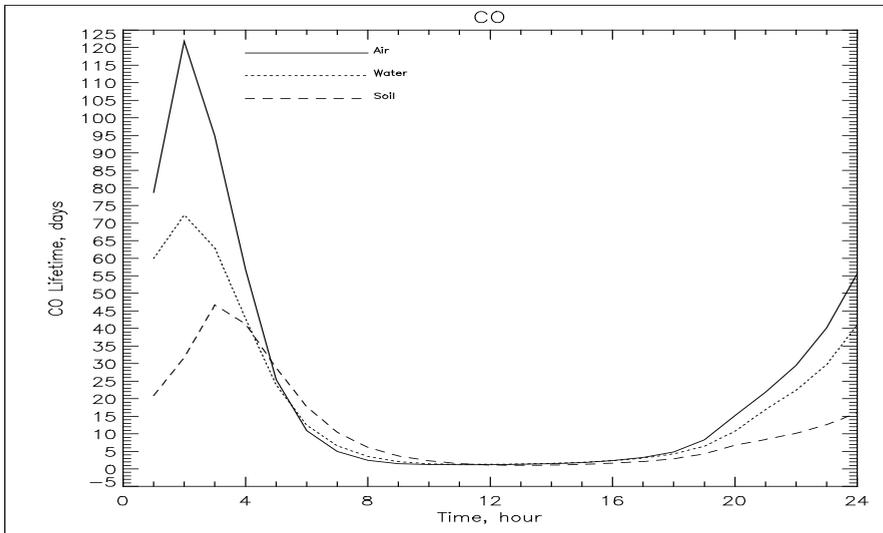
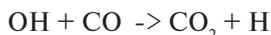
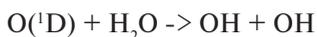


Рис. 1 – Время жизни угарного газа в разных частях геосферы

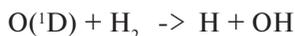
Результаты моделирования показывают, что время жизни угарного газа в сильной степени зависит от времени суток, что, вероятно, связано с его химическим разрушением гидроксильным радикалом OH [5]:



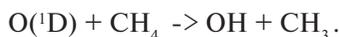
Гидроксильные радикалы образуются в атмосфере при реакциях возбужденного атомарного кислорода  $\text{O}(^1\text{D})$  с парами воды:



или с молекулярным водородом:



а также метаном

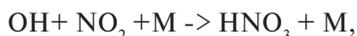


Таким образом, содержание гидроксильного радикала в тропосфере напрямую зависит от содержания возбужденного атомарного кислорода  $\text{O}(^1\text{D})$ , который, в свою очередь, формируется в тропосфере в результате фотодиссоциации озона при поглощении солнечной радиации короче 310 нм [6]:



В соответствии с данным химическим механизмом образования OH, он формируется только при наличии облучения солнечным светом. В этой связи скорость разрушения угарного газа днем существенно больше, чем ночью, а время его жизни, соответственно, ночью намного больше, чем днем. В этой связи угарный газ, попадающий в атмосферу в темное время, имеет большую вероятность вовлечения в трансграничный перенос, чем тот, который попадает в геосферу днем.

Другой группой токсичных газов геосферы, которые имеют как собственное влияние на качество воздуха, так и химически влияют на формирование вторичных загрязнителей, таких как озон, являются окислы азота [7]. Окислы азота попадают в геосферу как в результате природных, так и антропогенных процессов, а вымываются из атмосферы в другие части геосферы, главным образом, в результате химического перехода в азотную кислоту:



которая может конденсироваться при атмосферных условиях с последующим выпадением на поверхность с осадками [8].

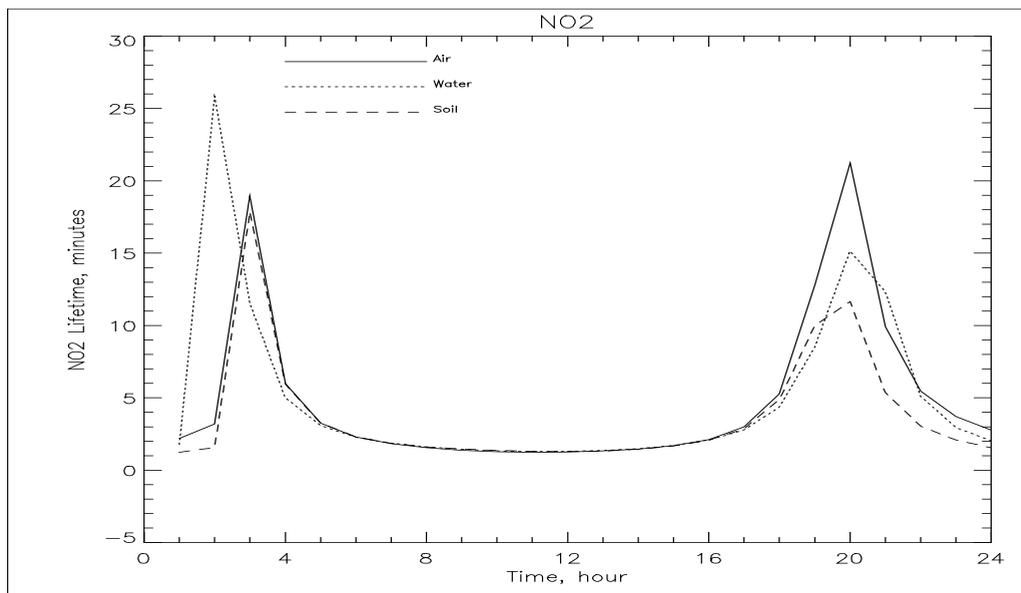
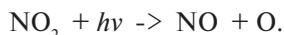
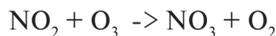


Рис. 2 – Время жизни двуокиси азота газа в разных частях геосферы

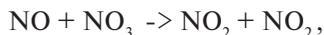
Однако окислы азота могут переходить из одной химической примеси в другую, меняя свои химические и физические свойства и, тем самым, влияя на экологическую обстановку и способность влиять на формирование вторичных химических загрязнителей. Так, приведенная на рисунке 2 двуокись азота при поглощении фотонов солнечного света может распасться и переходить в окись азота с формированием атомарного кислорода:



В результате фотолиза под воздействием солнечных лучей время жизни двуокиси азота в дневное время существенно меньше ночного (рис. 2), однако и в середине ночи время жизни двуокиси азота уменьшается за счет ее перехода в  $\text{NO}_3$  при химической реакции с озоном и последующим формированием  $\text{N}_2\text{O}_5$ :



В свою очередь, окись азота  $\text{NO}$  днем имеет большее время жизни, чем ночью (рисунок 3), т.к. ночью она может химически взаимодействовать с триоксидом азота:



которая ночью имеет значительно большие концентрации, чем днем, т.к. днем она быстро распадается в результате поглощения солнечного света в своих широких полосах поглощения [9].

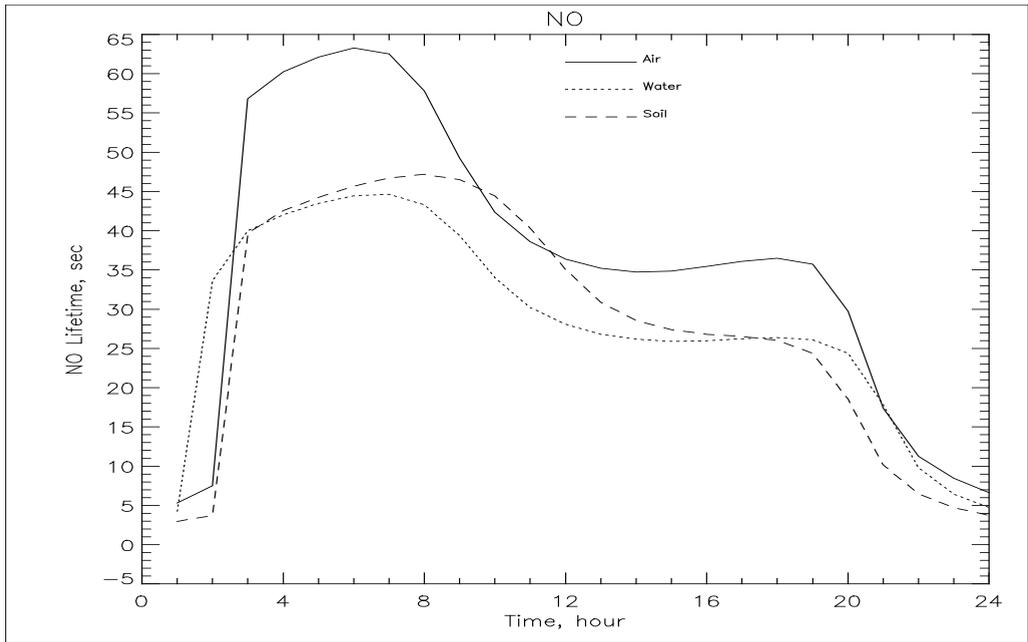


Рис. 3 – Время жизни окиси азота в разных частях геосферы

С другой стороны, как можно заметить из анализа рис. 2 и 3, времена жизни окислов азота и днем и ночью существенно меньше постоянных времени переноса атмосферными потоками массы [10]. В результате этого может создаться впечатление, что выбрасываемые в атмосферу окислы азота имеют только локальное значение, однако необходимо иметь в виду, что малые времена жизни окислов азота связаны с их переходами друг в друга, а не с вымыванием из атмосферы. Время жизни нечетного азота, представляющего собой сумму всех окислов азота определяется переходом в азотную кислоту с последующим вымыванием из атмосферы с облаками и осадками и составляет дни и недели в зависимости от метеорологических условий [11]. Таким образом, выбрасываемые в геосферу окислы азота оказывают воздействие не только на местные процессы изменения качества воздуха, но и могут влиять на экологию отдаленных регионов.

Основным вторичным токсичным газом является озон, который формируется в геосфере в результате рекомбинации атомарного кислорода.

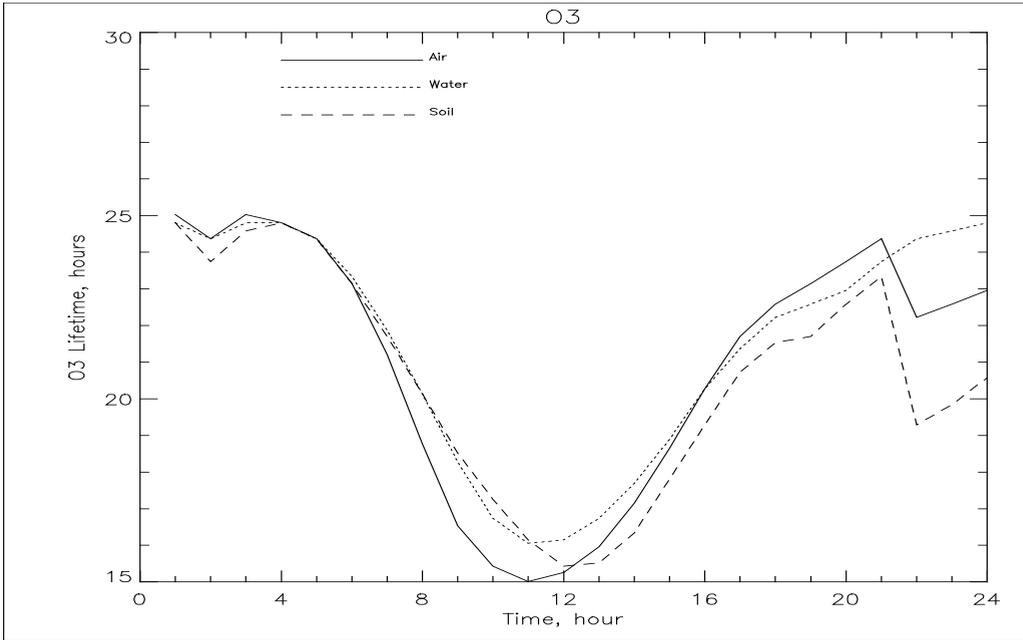
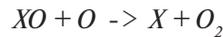
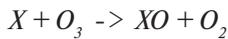


Рис. 4 – Время жизни озона в разных частях геосферы



Продукция атомарного кислорода, необходимого для образования озона в нижней атмосфере происходит в результате фотолиза двуокиси азота. Разрушение озона в атмосфере происходит в каталитических циклах с участием азотных и водородных примесей [12]:



где  $X$  и  $XO$  условно обозначают пары атмосферных радикалов водородного и азотного типа.

В средней атмосфере к ним добавляются еще хлорные и бромные составляющие [13]. В результате цепочки реакций молекулы озона и атомарного кислорода переходят в две молекулы кислорода, а концентрации взаимодействующих с ними веществ  $X$  и  $XO$  не меняются. Таким образом, после завершения цикла  $X$  и  $XO$  могут вновь разрушать новые молекулы озона. В качестве примеров  $X$  и  $XO$  можно привести пары  $H/OH$ ,  $OH/NO_2$ ,  $NO/NO_2$ ,  $Cl/ClO$ ,  $Br/BrO$  [14].

Разрушение озона в каталитических циклах более интенсивно происходит в дневное время, т.к. для замыкания цикла необходимо присутствие атомарного кислорода, а он формируется в результате процессов фотолиза только в светлое время. В этой связи время жизни озона днем существенно меньше, чем ночью (рис. 4), хотя его концентрация днем увеличивается, т.к. процессы формирования озона также связаны с атомарным кислородом и происходят только в светлое время [15].

При этом, как видно из рис. 4, в количественном отношении время жизни озона и днем и ночью составляет десятки часов, что означает, что он может переноситься атмосферными потоками, но не на очень дальние расстояния.

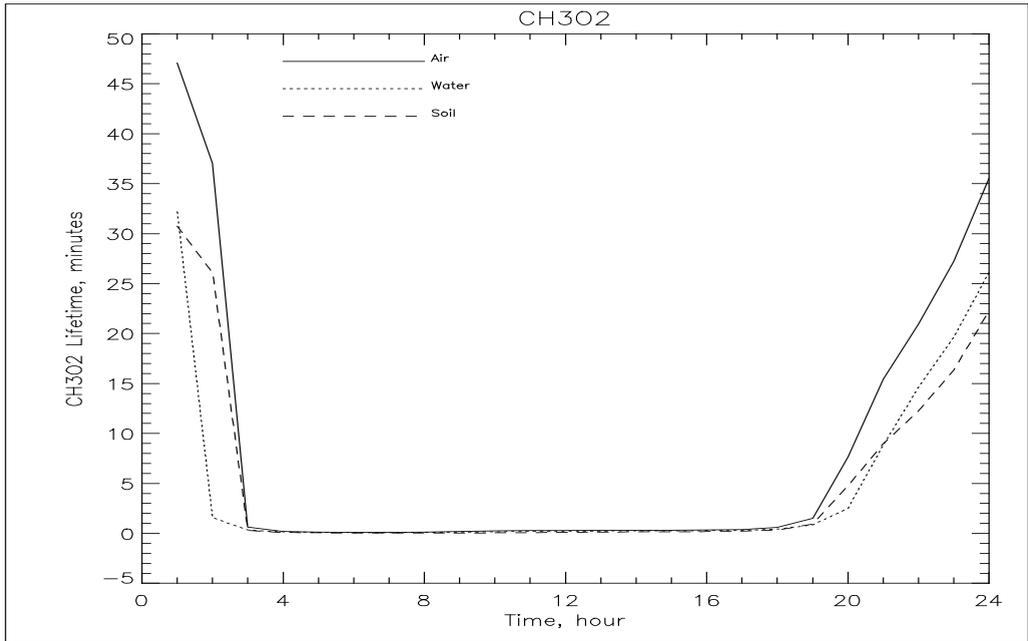


Рис. 5 – Время жизни  $\text{CH}_3\text{O}_2$  в разных частях геосферы

Еще одна группа газов, которые оказывают влияние как на первичную экологическую обстановку, так и на вторичное образование озона, связано с углеродом, как органическим, так и неорганическим [16]. Окисление углеводородов гидроксильным радикалом приводит к формированию озона, при этом ключевой примесью, которая формируется при первичных процессах химического окисления углеводородов, является  $\text{CH}_3\text{O}_2$ :



где R – представитель углеводородной группы примесей.

От дальнейшей трансформации  $\text{CH}_3\text{O}_2$  критически зависит, какое количество озона будет формироваться. В этой связи время жизни  $\text{CH}_3\text{O}_2$  представляет интерес для оценки химического загрязнения геосферы.

Из приведенных на рис. 5 результатов оценки времени жизни  $\text{CH}_3\text{O}_2$  видно, что,

во-первых, в количественном отношении его время жизни измеряется минутами, а вторых, в ночное время его время жизни существенно больше дневных значений. Количественные оценки показывают, что  $\text{CH}_3\text{O}_2$  с химической точки зрения имеет только локальное значение и не подвержен трансграничному переносу, а соотношение между дневными и ночными значениями времени жизни вновь подтверждает преобладание дневного формирования предвестников озона по сравнению с ночными процессами.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П734 от 20 мая 2010 г.), мероприятие 1.2.1 по направлению «Геохимия».

### Литература

1. *Brasseur G.* Atmospheric Chemistry and Global Change [Текст]/ G. Brasseur, J. Orlando, G. Tyndall, Oxford University Press, 1999
2. *Эммануэль А.Б., Кнорре Р.Б.* Основы химической кинетики. Наука. 1968. - 413 с.
3. *Jacobson M.Z.* Fundamental of atmospheric modeling. – University Press, Cambridge, 1999. – 656 pp.
4. *Seinfeld, J.H.* Atmospheric Chemistry and Physics / J.H. Seinfeld, S.N. Pandis // Wiley Interscience. 1998. P. 22-26.
5. *Jacob, D.J.* Introduction to Atmospheric Chemistry / D.J. Jacob // Princeton Univ. Press. 1999. P.23-24.
6. *Андруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Лисе П.* Введение в химию окружающей среды. Пер с англ. М.: Мир, 1999.
7. *МакИвен М., Филлунс Л.* Химия атмосферы, М., 1978
8. *DeMore W.B., Sander S.P., Golden D.M., Hampson R.F., Kurylo M.J., Howard C.J., Ravishankara A.R., Kolb C.E., Molina M.J.* Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling. Eval. 12, JPL Publication 97-4. Jet Propulsion Lab. Pasadena. 1997.
9. *Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyayev S.P.* Parameterization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103. № D17. P. 22047-22062.
10. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т.40. № 2. С. 211-222.
11. *Andersen S.B., Weatherhead E.C., Stevermer A., Austin J., Brhl C., Fleming E.L., Rosenfield J.E., de Grandpr J., Grewe V., Isaksen I., Rognerud B., Pitari G., Portmann R.W., Smyshlyayev S., Nagashima T., Velders G.J.M., Weisenstein D.K., Xia J.* Comparison of recent modeled and observed trends in total column ozone // Journal of Geophysical Research. 2006. V.111. No. D1, 4428 10.1029/2002JD002871, 2006.
12. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Зименко П.А., Кудрявцев А.П.* Моделирование влияния изменений спектральных потоков солнечной радиации, вызванных солнечной активностью, на содержание атмосферного озона // Метеорология и гидрология. –2005.–№ 8.–С.25 – 37
13. *Смышляев С.П., Кароль И.Л., Зубов В.А., Юдин В.А., Геллер М.А.* Двумерное моделирование сезонно-широтной изменчивости общего содержания атмосферного озона с использованием параметров крупномасштабного переноса из модели общей циркуляции атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 1. С. 81-94.
14. *Dvortsov V.L., Zvenigorodsky S.G., Smyshlyayev S.P.* On the use of Isaksen-Luther method of computing photodissociation rates in photochemical models // Journal of Geophysical Research. 1992. V.97. No. D7, P. 7593-7601.
15. *Smyshlyayev S.P., Geller M.A., Yudin V.A.* Sensitivity of model assessments of high-speed civil transport effects on stratospheric ozone resulting from uncertainties in the  $\text{NO}_x$  production from lightning // Journal of Geophysical Research. 1999. V.104. No. D21, P. 26401-26417.
16. *Меньшиков В.В., Швыряев А.А.* Опасные химические объекты и техногенный риск: Учебное пособие. М.: Изд-во Химия, фак. Моск. ун-та, 2003.

*С.П. Смышляев, П.А. Блаkitная, М.А. Моцаков*

**МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ НА ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕОСФЕРЕ**

*S.P. Smyshlyayev, P.A. Blakitnaya, M.A. Motsakov*

**A MODEL OF THE MAN-MADE GASEOUS EMISSIONS IMPACT ON THE CHEMICAL PROCESSES IN THE GEOSPHERE**

*Описывается модель математического описания химических процессов в геосфере. Рассматриваются общие подходы к математической параметризации скоростей химических реакций первого, второго и третьего порядков, также как и процессов фотолиза. Предлагается алгоритм разделения химических процессов геосферы на основе сравнения их характерных времен.*

*Ключевые слова: модель, химические реакции, математическое описание, сравнение масштабов*

*A mathematical model of the chemical processes in the geosphere is described. The common approaches to the mathematical parameterization of the chemical reaction rates for first, second and third order reactions are considered. An universal algorithm for chemical processes separation based on their lifetime comparison is suggested.*

*Key words: model, chemical reactions, mathematical description, scale comparison*

Проблема моделирования химических реакций в геосфере заключается в выборе метода математического описания химической трансформации продуктов естественных и антропогенных выбросов в геосферу.

Математическая формулировка задачи базируется на системе уравнений неразрывности многокомпонентной среды при наличии химических реакций [1]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} + V \cdot \nabla X = R(X), \quad (1)$$

где  $X = X_1, X_2, \dots, X_N$  - вектор концентраций рассматриваемых примесей,  $N$  - число рассматриваемых примесей,  $V \cdot \nabla$  - линейный дифференциальный оператор, описывающий пространственный перенос примеси,  $R$  - скорость фотохимического изменения, которая определяется протекающими в атмосфере процессами фотодиссоциации, бимолекулярными и трехмолекулярными химическими реакциями, мономолекулярным распадом и гетерогенными процессами.

Скорость фотодиссоциации  $S_i$  какой либо компоненты с концентрацией  $X_i$  описывается, согласно [2] реакцией первого порядка:

$$S_i = J_i X_i, \quad (2)$$

где  $J_i$  - коэффициент фотодиссоциации:

$$J_i = \int_{\Delta\lambda} \sigma_i(\lambda) v_i(\lambda) F_\lambda d\lambda, \quad (3)$$

где  $\lambda$  - длина волны солнечного излучения,  $\Delta\lambda$  - спектральная область фотодиссоциации  $i$ -й компоненты,  $\sigma_i$  - сечения поглощения,  $v_i$  - квантовый выход реакции,  $F_\lambda$  - суммарный поток радиации с длиной волны  $\lambda$  в данной точке пространства.

Скорости химических реакций и мономолекулярного распада параметризуются в терминах химической кинетики [3]. При этом скорости бимолекулярных реакций типа  $X_i + X_j \rightarrow X_l + X_m$  описываются выражением

$$\frac{dX_l}{dt} = \frac{dX_m}{dt} = -\frac{dX_i}{dt} = -\frac{dX_j}{dt} = k_b X_i X_j, \quad (4)$$

где  $k_b$  - лабораторная константа данной химической реакции, рассчитываемая по формуле Аррениуса [4]:

$$k_b = A \exp(-E/(RT)), \quad (5)$$

Здесь  $A$  - лабораторная константа,  $E$  - энергия активации данной реакции,  $R$  - универсальная газовая постоянная,  $T$  - температура.

Более сложным образом описываются скорости протекающих в атмосфере трехмолекулярных реакций типа  $X_i + X_j + M \rightarrow X_l + M$ , где  $M$  - концентрация воздуха. Реакции такого типа сильно зависят от давления [5]. При низких давлениях время между столкновениями образующегося на первой стадии реакции возбужденного комплекса с дезактивирующей молекулой больше или сравнимо со временем жизни возбужденного комплекса и реакция является тримолекулярной. При высоких давлениях время между столкновениями мало по сравнению со временем жизни возбужденного комплекса и он успевает дезактивироваться до распада. Реакция при этом является бимолекулярной. С учетом этого скорость трехмолекулярной реакции описывается по аналогии с бимолекулярными реакциями:

$$\frac{dX_l}{dt} = -\frac{dX_i}{dt} = -\frac{dX_j}{dt} = k_p X_i X_j, \quad (6)$$

где  $k_p$  описывается универсальной формулой Линдемана-Хиншельвуда [6]:

$$k_p = F_p \frac{k_0 M}{1 + k_0 M / k_\infty}, \quad (7)$$

где

$$F_p = F_0 [1 + (\lg \frac{k_0 M}{k_\infty})^2]^{-1},$$

$$k_0 = A_0 (T/300)^{-n},$$

$$k_\infty = A_\infty (T/300)^{-m},$$

а  $F_0, A_0, A_\infty, n, m$  - лабораторные константы данной химической реакции.

Процессы мономолекулярного распада типа  $X_i + M \rightarrow X_l + X_m + M$  рассматриваются как реакции второго порядка и их скорости записываются в виде

$$\frac{dX_l}{dt} = \frac{dX_m}{dt} = -\frac{dX_i}{dt} = k_m X_i M, \quad (8)$$

где  $k$  определяется по формуле Аррениуса (5).

Гетерогенные процессы на атмосферном аэрозоле в фотохимических моделях описываются уравнениями первого порядка [6]:

$$\frac{dX_i}{dt} = -k_a X_i \quad (9)$$

Константы гетерогенных реакций  $k_a$  вычисляются в предположении свободно-молекулярного режима [7].

Таким образом, слагаемые в правой части системы (1), выражающие скорости фотохимического изменения рассматриваемых малых газов, можно записать в виде:

$$R_j = \sum_{i,m} k_{im} X_i X_m + \sum_l J_l X_l - \left( \sum_m k_{jm} X_m + J_j + k_{mj} + k_{aj} \right) X_j \quad (10)$$

$$j = 1, 2, \dots, N,$$

где члены в правой части с положительным знаком описывают фотохимическую продукцию (за счет химических реакций и фотодиссоциационных процессов), а члены с отрицательным знаком - фотохимическое разрушение (за счет химических реакций, фотодиссоциационных процессов, мономолекулярного распада и гетерогенных процессов).

Чтобы полностью сформулировать задачу необходимо еще задать область определения  $\Omega$  с границей  $G$  и задать граничные и начальные условия:

$$lX = g \quad (11)$$

$$X|_{t=0} = X_0, \quad (12)$$

где  $l$  - линейный оператор граничного условия,  $X_0$  - вектор начальных значений концентраций рассматриваемых газов.

Сформулированная задача является нелинейной смешанной краевой задачей [7]. Для подобных задач пока не разработаны методы получения аналитических решений и поэтому для их решения используются численные методы [7]. Их применение заключается в замене области непрерывного изменения аргументов областью их дискретного изменения, а также в замене дифференциальных операторов - разностными с дальнейшим решением полученной таким образом алгебраической системы уравнений.

Для решения поставленной задачи разностными методами необходимо рассмотреть вопрос о ее корректности, аппроксимации, устойчивости и сходимости. Как известно, задача называется корректно поставленной, если для любых входных данных из некоторого класса решение существует, единственно и устойчиво по входным данным [7]. Для существования решения необходима и достаточна непрерывность и ограниченность правой части (1) в области изменения аргументов [8]. Выполнение

этих требований вытекает из физической постановки задачи.

Если решение существует и выполняется условие Липшица [9]

$$\| f(t, X_1) - f(t, X_2) \| \leq k_L \| X_1 - X_2 \|, \quad (13)$$

где

$$f(t, X) = R(X) - LX \quad (14)$$

то, согласно [8], можно доказать единственность решения. Как показано в [8], для слагаемых, входящих в (14) с определенным знаком условие Липшица выполняется, а для члена, выражающего скорость фотохимического изменения, его выполнение станет очевидным, если использовать основные положения химической кинетики [5]. Таким образом, решение поставленной задачи существует и единственно.

Задача называется устойчивой по входным данным, если ее решение непрерывно зависит от входных данных, т.е.  $\|\delta X\| \rightarrow 0$  при  $\|\delta t\| \rightarrow 0$ . Как показано в [9], для устойчивости задачи по входным данным достаточно выполнения условия Липшица (13).

Таким образом, задача поставлена корректно.

Поставленная задача является смешанной краевой задачей [9]. Для сведения ее к задаче с начальными данными (задаче Коши) необходимо задать шаблон в выбранной пространственной области и аппроксимировать на нем дифференциальные операторы по пространственным переменным их конечно-разностными аналогами. В результате система дифференциальных уравнений (1), (10)-(12) заменяется системой дифференциально-разностных уравнений:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \Lambda Y = R(Y), \quad (15)$$

где  $Y$  – конечно-разностная функция концентраций рассматриваемых газов во всех пространственных узлах, соответствующая непрерывной функции  $X$ ,  $\Lambda$  – конечно-разностное представление дифференциального оператора  $\nabla$ .

Рассматриваемая задача Коши обладает рядом специфических особенностей, ограничивающих использование для ее решения многих обычно применяемых численных методов. Так, высокие скорости химических реакций обуславливают сильную связь между уравнениями - ее жесткость [9]. Математически это выражается большим разбросом модуля собственных значений матрицы Якоби [8]:

$$\max(\text{Re}(-\lambda_i)) / \min(\text{Re}(-\lambda_i)) \gg 1, \quad (16)$$

где  $\lambda_i$  – собственные числа матрицы Якоби

$$J(t, Y) = \| \partial f / \partial Y \|. \quad (17)$$

Жесткость задачи приводит к практической непригодности для ее решения явных вычислительных схем, т.к. для устойчивости явной схемы необходимо, чтобы шаг по времени не превышал минимальной временной постоянной системы, отвечающей максимальному собственному значению Якобиана  $\tau_{\min} = 1/\max(\text{Re}(-\lambda_i))$ , в

то же характерное время задачи определяется максимальной локальной временной постоянной, отвечающей минимальному собственному значению матрицы Якоби. В этой связи, для достижения сходимости решений необходимое количество шагов будет порядка коэффициента жесткости (отношение максимального собственного числа к минимальному), который для атмосферных задач достигает  $10^7 - 10^8$ .

В связи с трудностями, возникающими при решении «жестких» задач традиционными методами, разрабатываются специальные методы для подобных систем уравнений [9]. Среди этих методов применительно к фотохимическому моделированию атмосферных процессов можно выделить два направления: применение общих методов решения «жестких задач» и разработка специальных методов для фотохимического моделирования.

При применении общих методов для аппроксимации дифференциальных уравнений типа (15) конечно-разностными используются линейные одношаговые или многошаговые А-устойчивые методы, для которых областью абсолютной устойчивости является вся полуплоскость  $\text{Re}(\tau\lambda) < 0$ . Полученная система алгебраических уравнений решается методом Ньютона-Рафсона [9]:

$$[I - \tau\beta f^{(m)}]J(X_{j+1}^{(m)} - X_j^{(m)}) = -X_{j+1}^{(m)} + \tau\beta f(t + \tau, X_{j+1}^{(m)}) + g, \quad (18)$$

где  $I$  – единичная матрица,  $\tau$  – шаг по времени,  $\beta$  – неявный коэффициент выбранного А-устойчивого метода,  $J$  – якобиан системы,  $m$  – номер итерации,  $g$  – заданный вектор, объединяющий явные члены уравнения.

Учитывая (2.10), применение метода Ньютона-Рафсона (9) к системе (2.15) сводится к следующей линейаризации каждого слагаемого суммы (10):

$$k_{ij}X_iX_j = k_{ij}X_i^jX_i^{j+1} + k_{ij}X_i^{j+1}X_i^j - k_{ij}X_i^jX_i^j, \quad (19)$$

где  $j$  обозначает номер временного слоя ( $j$  – явный,  $j+1$  – неявный). Для решения получающейся алгебраической системы необходимо на каждом шаге обращать квадратную матрицу размерности  $(N \times K)$ , где  $N$  – количество рассматриваемых атмосферных газов,  $K$  – число узлов сетки), что оказалось малоэффективным, учитывая уровень доступных ЭВМ.

Однако при попытке сгруппировать все рассматриваемые компоненты в несколько семейств можно существенно ухудшить точность вычислений, так как вычисление концентраций малых газов через концентрации семейств не ухудшает точность только при выполнении следующих условий:

1. Фотохимическое время жизни компонентов, включаемых в семейства, много меньше постоянной времени переноса;
2. Значение скоростей фотохимических реакций, определяющих распределение концентраций внутри семейств, должно быть много больше скоростей реакций, влияющих на суммарную концентрацию семейств;

Поскольку невозможно добиться выполнения этих условий для всех рассматриваемых компонентов во всех узлах пространственной сетки, а общие методы реше-

ния жестких задач требуют нереально больших затрат машинного времени, при разработке предлагаемого алгоритма авторы использовали комбинированный метод.

В семейства были сгруппированы только те малые газовые составляющие, для которых безусловно выполнялись приведенные выше условия. Остальные компоненты по соотношению их фотохимических времен жизни с постоянной времени переноса разбивались на долгоживущие и короткоживущие. Для долгоживущих совместно с введенными семействами рассматривались дифференциально-разностные уравнения типа (15). Их аппроксимация конечноразностными уравнениями осуществлялась А-устойчивым одношаговым методом [8]:

$$\frac{X_{i,k}^{j+1} - X_{i,k}^j}{\tau} = 0.55 f(t + \tau, X_{i,k}^{j+1}) + 0.45 f(t, X_{i,k}^j). \quad (20)$$

В системе уравнений (10), (14), (20) член, описывающий скорость фотохимического изменения, разбивается на продукцию (P) и разрушение (D):

$$R = P - DX \quad (21)$$

При этом для усиления диагонального преобладания слагаемое правой части (21), описывающее разрушение, берется на неявном временном слое, а выражающее продукцию - на явном итерационном слое.

Для короткоживущих малых газовых примесей А-устойчивый метод аппроксимации применяется к упрощенному уравнению

$$\frac{X^{j+1} - X^j}{\tau} = 0.55(P^j - D^j X^{j+1}) + 0.45 f(t, X^j) \quad (22)$$

откуда получаем выражение для  $X^{j+1}$

$$X^{j+1} = \frac{X^j + \frac{1}{\tau}[0.55 P^j + 0.45 f(t, X^j)]}{\frac{1}{\tau} + D^j}. \quad (23)$$

Поскольку  $P$  и  $D$  берутся с предыдущего итерационного слоя, то необходимо сделать несколько итераций для приближения к неявному слою.

Для упрощения процесса расчета фотохимического изменения малых газов атмосферы авторы разработали специальный алгоритм решения жесткой системы уравнений фотохимии атмосферы. Алгоритм основывается на использовании понятия времени жизни газов относительно фотохимического изменения:

$$\tau_j = X_j / (P_j - D_j X_j). \quad (24)$$

Для каждого газа, в каждой точке пространства оценивается время жизни относительно фотохимического изменения. Для тех газов, время жизни которых превосходит шаг по времени в 50 и более раз, вычисления фотохимического изменения не производятся и их концентрации фиксируются при расчете изменения концентраций газов, имеющих меньшее время жизни. Для тех газов, время жизни которых не превосходит установленный порог, после каждой итерации производится сравнение

полученного значения с вычисленным на предыдущей итерации. Если изменение не превосходит 0.1 %, то концентрация этого газа фиксируется в процессе вычисления концентраций газов, для которых изменение концентрации еще превосходит 0.1 %.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П734 от 20 мая 2010 г.), мероприятие 1.2.1 по направлению «Геохимия».

### Литература

1. *Seinfeld, J.H.* Atmospheric Chemistry and Physics / J.H. Seinfeld, S.N. Pandis // Wiley Interscience. 1998. P. 22-26.
2. *Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyaev S.P.* Parameterization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103. № D17. P. 22047-22062.
3. *Эммануэль А.Б., Кнорре Р.Б.* Основы химической кинетики. Наука. 1968. - 413 с.
4. *Jacob, D.J.* Introduction to Atmospheric Chemistry / D.J. Jacob // Princeton Univ. Press. 1999. P.23-24.
5. *Brasseur G.* Atmospheric Chemistry and Global Change [Текст]/ G. Brasseur, J. Orlando, G. Tyndall, Oxford University Press, 1999
6. *Андруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Лице П.* Введение в химию окружающей среды. Пер с англ. М.: Мир, 1999.
7. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т.40. № 2. С. 211-222.
8. *Jacobson M.Z.* Fundamental of atmospheric modeling. – University Press, Cambridge, 1999. – 656 pp.
9. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. - М.: Мир, 1979. - 312 с.

*А.В. Илларионов, А.А. Лебедева, Д.В. Шилов*

## **РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММЫ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВБЛИЗИ ПОЛИГОНА ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ «КРАСНЫЙ БОР»**

*A.V. Illarionov, A.A. Lebedeva, D.V. Shilov*

## **DEVELOP SCHEMES FOR INTEGRATED SURVEILLANCE SYSTEMS ENVIRONMENT NEAR THE RANGE OF TOXIC WASTE “KRASNY BOR”**

*В данной статье рассматривается влияние климатических особенностей территории расположения полигона «Красный Бор» на распространение загрязнения, а также влияние гидрографической сети территории расположения полигона «Красный Бор» на характер распространения загрязнения. Рассматриваются технологии, применяемые на полигоне «Красный Бор». Также описывается разработка комплексной программы системы наблюдений за состоянием окружающей среды.*

*Ключевые слова: загрязнение окружающей среды, высокотоксичные отходы, полигон опасных отходов, климат, гидрографическая сеть.*

*This article examines the influence of climatic features of the territory of the location of the landfill «Krasny Bor» in the spread of contamination and the effect of drainage area site location «Krasny Bor» the nature of the pollution. We consider the technology used at the landfill, «Krasny Bor». Also describes the development of a comprehensive program of observations of the environment.*

*Keywords: environmental pollution, toxic waste, hazardous waste landfill, climate, hydrographic network.*

В 1960-х годах, в связи с возрастающим загрязнением окружающей среды г. Ленинграда и Ленинградской области, возникла проблема надежного и эффективного складирования высокотоксичных отходов промышленных предприятий. До этого времени ликвидация промышленных отходов, нередко очень опасных, осуществлялась каждым предприятием индивидуально путем сброса без предварительной очистки в канализацию, близлежащие водоемы и водотоки, вывоза и складирования на случайно выбранных, неохраняемых и не ограждаемых участках, как правило, без согласования с геологической и санитарной службами.

Таким образом, к 1965 году возникла острая необходимость в организованном захоронении промышленных отходов, что обусловило организацию временной свалки промышленных отходов предприятий г. Ленинграда и области.

Опытный полигон опасных промышленных отходов, ныне Государственное унитарное природоохранное предприятие «Полигон «Красный Бор» организован на основании решения Ленгорисполкома от 02.12.67 N 1068 и открыт в 1969 году.

Полигон «Красный Бор» расположен на площади 60 га в 2 км к северу от поселка Красный Бор, в 4.5 км к юго-востоку от города Колпино и в 4 км от административной границы Санкт-Петербурга (рисунок 1).

В существующей трехкилометровой санитарно-защитной зоне (СЗЗ) полигона «Красный Бор» расположены часть поселка Красный Бор и г. Никольское (Никольское-Перевоз), полностью — деревни Мишкино, Феклистово, Поркузи, а также территории садоводческих кооперативов и земли совхоза им. Тельмана. В границах СЗЗ постоянно проживает около 2 000 человек, из них около 140 детей в возрасте от 3-х до 12-ти лет. Всего в населенных пунктах постоянно проживает до 25 000 человек.

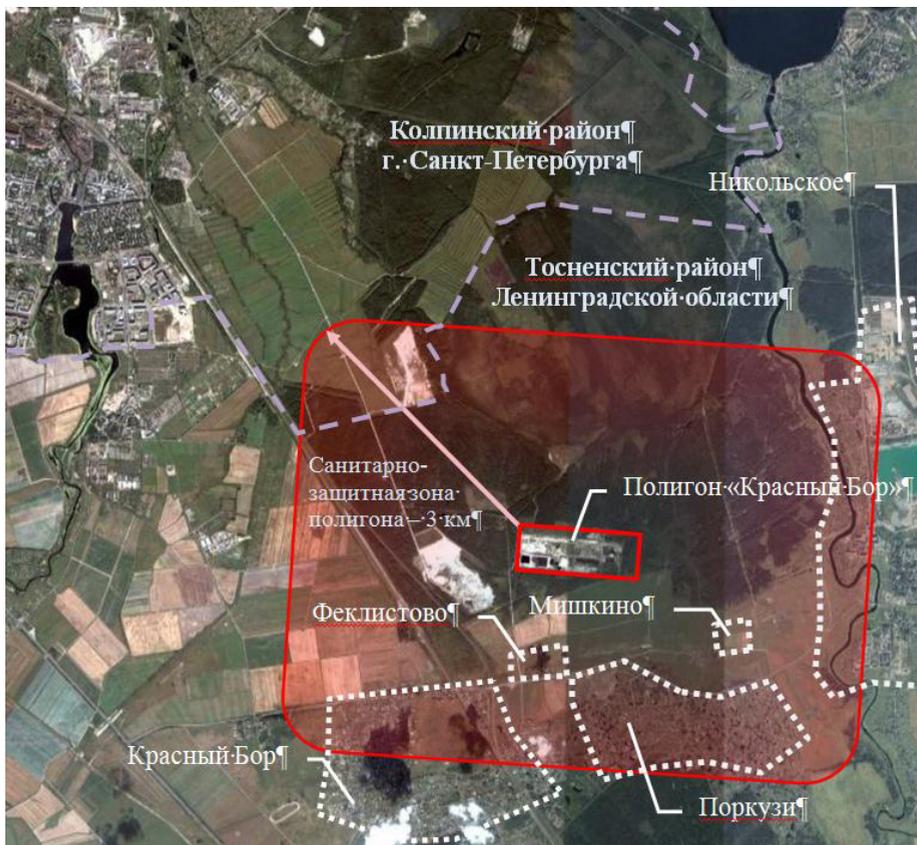


Рис. 1 – Район расположения полигона «Красный Бор»

**Влияние климатических особенностей территории расположения полигона «Красный Бор» на распространение загрязнения**

Климатические особенности в рассматриваемом районе обуславливаются особенностями общей циркуляции атмосферы. Район относится к атлантико-арктической зоне умеренного пояса. Для этой зоны характерно преобладание воздушных масс арктического и атлантического происхождения, переносимых из мест формирования, благодаря циклонической деятельности, преобладающей во все времена года. Циклоны на рассматриваемый район перемещаются во все сезоны главным образом с запада, осенью и зимой велика также повторяемость перемещения циклонов с северо-запада, а весной и летом нередки выходы юго-западных циклонов. Антициклоническая деятельность для данного района чаще всего развивается в летние месяцы. Они приходят в район Санкт-Петербурга в большинстве случаев с запада и северо-запада, однако возможны вхождения их и с других направлений.

Различные метеорологические условия по-разному влияют на уровень загрязнения воздуха вредными примесями. В зависимости от условий погоды концентрации вредных веществ в воздухе могут изменять в десятки и даже сотни раз.

Общий анализ особенностей ветрового режима показывает, что под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов в этот период года преобладающее направление ветра формируется от южной составляющей с постепенным поворотом по часовой стрелке до западной составляющей. Для этих направлений характерной чертой, определяющей воздушные переносы, является значительная скорость ветра от 9 до 12 м/с.

Преобладающими направлениями воздушных переносов в районе расположения полигона «Красный Бор» являются западное и юго-западное направления, т. е. переносы по линии полигон «Красный Бор» - ручей Безымянный-река Тосна (северная оконечность поселка Никольское).

В тоже время, с точки зрения оценки возможного влияния загрязнения воздуха в близлежащих к полигону населенных пунктах (поселкам Красный Бор, Мишкино, Феклистова, Поркузи) необходимо, в первую очередь, учитывать ветра северной четверти.

Следует также отметить, что наряду с ветром важнейшей характеристикой, определяющей условия распространения примесей, является вертикальное распределение температуры воздуха. Наличие слоев температурных инверсий (слоев, в которых температура с высотой растет) препятствует вертикальному перемешиванию воздуха.

При наличии приземных инверсий обычно создаются условия, неблагоприятные для рассеяния примесей от низких и неорганизованных источников. Приземные инверсии составляют 36 % всех наблюдений (почти половину всех случаев инверсий). Мощность приземных инверсий колеблется от нескольких десятков метров до 2 км.

Уровень загрязнения воздуха может зависеть также от наличия различных метеорологических явлений и процессов. Наиболее существенно влияние туманов и осадков.

При выпадении осадков, наоборот, наблюдаются условия, благоприятные для очищения воздуха от большинства вредных примесей.

### **Влияние гидрографической сети территории расположения полигона «Красный Бор» на характер распространения загрязнения**

Гидрографическая сеть вблизи полигона развита слабо. Непосредственно в районе полигона – в 0.8 км к северу и в 1.5 км к западу от него протекают два ручья, глубиной 0.8-1.2 м. В 2 км севернее полигона ручьи сливаются, образуя начало реки Б. Ижорка (Большой Ижорец), которая в свою очередь, впадает справа в р. Ижору. Размер активной водосборной площади составляет порядка 15 га.

На восток от полигона в 2 км находится исток ручья Безымянный, являющегося левым притоком р. Тосна. Следует также отметить, что к северо-востоку от полигона по направлению к ручью Безымянный наблюдается небольшой ручей, протекающий с юга на север (от района полигона) и впадающий слева в ручей Безымянный.

Вышеперечисленные естественные водотоки имеют равнинный характер, то есть слабое течение и незначительные глубины (за исключением реки Тосны и нижнего течения Большой Ижорки). Из искусственных элементов гидрографической сети следует отметить кольцевой и магистральный каналы полигона «Красный Бор».

Средний уклон поверхности водосбора в западном направлении составляет примерно 2.7 ‰, изменяясь на отдельных участках от 1.5 ‰ до 3.7 ‰. Средний уклон поверхности водосбора, прилегающего к полигону «Красный Бор» с востока составляет примерно 3.4 ‰, изменяясь от 2.1 ‰ до 5.0 ‰.

Трансформация химического состава подземных вод в районе полигона является основным источником загрязнения региональных поверхностных водоемов. Другим источником загрязнения поверхностных вод являются временные водные потоки дождевого и талого происхождения, выносящие загрязняющие компоненты с поверхности полигона.

### **Технологии, применяемые на полигоне «Красный Бор»**

*Первоначальная технологическая схема* предполагала прием и захоронение в открытых в массиве кембрийских глин (ниже уровня поверхности) емкостях - картах промышленных отходов 3-4 классов опасности (по ныне действующей классификации). Опасные отходы 1 и 2 класса опасности собирались в специально изготовленные непроницаемые контейнеры длительного хранения.

*Применяемые технологии* на момент начала исследования в 2005 году представляли из себя следующие процессы. Отходы принимались в карты-котлованы, открытые в толще водоупорных кембрийских глин, мощностью порядка 70 м. Карты-котлованы имеют размеры по верху: ширина - от 30 до 120 м, длина - от 40 до 200 м. Глубина котлованов - от 6 до 24 м.

Отходы жидкие органического состава и неорганического состава принимались в отдельные котлованы. Слив отходов из специализированных автоцистерн производится по лоткам, установленным по откосу котлованов. Все сдаваемые на ГУПП «Полигон «Красный Бор» отходы сопровождаются специальным технологическим паспортом.

Твердые отходы складировались в котлованы, освободившиеся после переработки содержавшихся в них жидких отходов. Выгрузка отходов производилась в карты, или на площадку у карты с последующим сталкиванием отходов в карту-котлован с помощью бульдозера

Особо опасные отходы, содержащие сильнодействующие ядовитые вещества (1-2 класс опасности), принимались в специальные герметичные контейнеры из стали из СТ-3. толщиной 10 мм внутри забетонированные по металлической сетке, снаружи залитые битумом. Контейнеры поступали на полигон, размещаются в котлованах с изоляцией друг от друга слоем глины. После заполнения котлован сверху закрывали глиной и производили ландшафтное планирование.

Горючие отходы. Жидкие отходы органического состава, содержащие до 10% воды используется в качестве топлива и принимается сразу в топливные емкости.

Установка термического обезвреживания (УТО) представляет собой кессон из железобетонных плит, в который опущена металлическая труба. Часть трубы футерована огнеупорным кирпичом и является камерой сгорания, температура в факеле достигает 1100 – 1300 °С. После смешения с парами воды и органических веществ I происходит их горение при недостаточно изученных параметрах.

За время действия полигона, на площади свыше 50 га, накоплено и захоронено 1678000 тонн опасных отходов. В настоящее время заполнены и закрыты 62 карты (котлована). За истекшие более чем тридцать лет Полигон выполнил свою природоохранную задачу по изоляции опасных отходов, однако, к настоящему времени эксплуатационные мощности его в значительной мере исчерпаны, технология морально устарела.

### **Система мониторинга за качеством окружающей среды вблизи полигона «Красный Бор»**

Программа производственного экологического мониторинга на СПбГУПП «Полигон «Красный Бор» и СЗЗ до 2005 года предполагала контроль загрязнения воздуха рабочей зоны, контроль воздуха на границе СЗЗ и внутри нее, контроль дренажных ливневых вод, контроль состояния воды в поверхностных водотоках в нескольких точках (в основном, на притоках реки Большая Ижорка). Программа носила систематический характер, но сильно локализована и ограничивалась измерениями в небольшом количестве точек наблюдений за атмосферой, поверхностными и подземными водами.

Контроль осуществляется на содержание различных групп соединений, в том числе тяжелых металлов и органики (таблица 1). Отбор проб в соответствии с Программой производился с дискретностью 10 дней – до 2 раз в год (для различных сред).

**Программа ведомственного мониторинга на полигоне «Красный Бор» (в части, относящейся к санитарно-защитной зоне)**

Места отбора	Период отбора	Ингредиенты
<b>Исследования атмосферного воздуха на границе СЗЗ и внутри нее</b>		
<p>Точки отбора по 3 румбам в районе населенных пунктов Красный Бор, Мишкино, Феклисто-во, Перевоз, карьера, садоводства, подъездной дороги к полигону. Отбор производится под-факельно, в зависимости от направления ветра на расстоянии 1, 2 и 3 км (на границе СЗЗ)</p>	<p>1 раз в квартал в зимний период с декабря по апрель. 1 раз в 2 месяца в период с апреля по ноябрь.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Двуокись серы</li> <li>2. Двуокись азота</li> <li>3. Фенол</li> <li>4. Формальдегид</li> <li>5. Серная кислота</li> <li>6. Свинец и его неорганические соединения (в пересчете на свинец)</li> <li>7. Хром (6+)</li> <li>8. Сероводород</li> <li>9. Бензол</li> <li>10. Толуол</li> <li>11. Хлорбензол</li> <li>12. Спирт изобутиловый</li> <li>13. Ртуть</li> <li>14. Трикрезол</li> <li>15. Этилацетат</li> <li>16. Бенз/а/пирен</li> <li>17. Эпихлоргидрин</li> <li>18. Бутилацетат</li> <li>19. Ацетон</li> <li>20. Ксилол</li> <li>21. Гексан</li> <li>22. Гептан</li> <li>23. Трихлорэтилен</li> <li>24. Тетрахлорэтилен</li> </ol>
<b>Исследования поверхностных вод</b>		
<p>2 точки в кольцевом канале (в 100 м слева и справа от начала магист-рального канала)</p>	<p>3 раза в месяц</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Температура</li> <li>2. Растворенный кислород</li> <li>3. Взвешенные вещества</li> <li>4. Водородный показатель рН</li> <li>5. Сухой остаток</li> <li>6. Прокаленный остаток</li> <li>7. Хлориды</li> <li>8. Сульфаты</li> <li>9. Никель</li> <li>10. Медь</li> <li>11. Цинк</li> <li>12. Алюминий</li> <li>13. Марганец</li> <li>14. Хром</li> <li>15. Нефтепродукты</li> </ol>

Продолжение таблицы 1

Места отбора	Период отбора	Ингредиенты
		16. Железо СПАВ 17. Формальдегид 18. Фториды 19. Фенол 20. Показатель ХПК 21. Азот аммонийный 22. Азот нитратный 23. Азот нитритный 24. Хлороформ 25. Ртуть 26. М-крезол 27. Хлорфенол 28. Хлоркрезол 29. Мышьяк
<b>Исследования почвы</b>		
Точки отбора по 4 румбам (ЮЗ, ЮВ, СЗ, СВ) на расстоянии 1, 2 и 3 км на глубине 5-10 см, 20-40 см, 60-90 см	2 раза в год	1. Хлориды 2. Фториды 3. Сульфаты 4. Нитриты 5. Нитраты 6. Фосфаты 7. Ртуть 8. Свинец 9. Хром 10. Медь 11. Цинк 12. Никель 13. Марганец 14. Кобальт 15. Кадмий 16. Нефтепродукты 17. Полихлорированные бифенилы 18. Бенз/а/пирен 19. Фенол 20. Ксилолы 21. Ванадий 22. Крезол
<b>Исследования растений</b>		
Точки отбора по 4 румбам (ЮЗ, ЮВ, СЗ, СВ) на расстоянии 1, 2 и 3 км	2 раза в год в июле и октябре	1. Медь 2. Цинк 3. Свинец 4. Кадмий 5. Мышьяк 6. Ртуть

Действовавшая ранее система ведомственного мониторинга, в основном, предназначена для оперативного выявления возникновения нештатных (аварийных) ситуаций и принятия оперативных управленческих решений по их ликвидации или локализации, но не обеспечивает возможности получения информации об общем экологическом состоянии района полигона, а именно, не позволяет выявить роль самого полигона на фоне сопутствующих источников загрязнения, находящихся в этом районе (промышленных предприятий и несанкционированных свалок).

### **Исследования, проводимые вблизи полигона «Красный Бор»**

За последние 20 лет по району полигона работали различные как научные, так и производственные организации, занимавшиеся в основном оценками различных аспектов влияния полигона «Красный Бор» на окружающую среду.

Среди первых можно отметить Российский государственный гидрометеорологический университет, Горный институт, НИИ земной коры, НИЦЭБ РАН, Санкт-Петербургскую медицинскую академию им. И.И. Мечникова и другие. Также имеются материалы СЗГП «Севзапгеология», НТФ «Геофизпрогноз», служб Управления санитарно-эпидемиологического надзора Ленинградской области и других. Ниже представлены обобщенные оценки анализа сложившейся экологической обстановки в районе расположения полигона «Красный Бор».

На полигоне «Красный Бор» до 2005 года отсутствовала комплексная эффективная система фоновых мониторинга параметров состояния природной среды и ее компонентов в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ). В тоже время специализированный статус полигона предъявляет повышенные требования к информации, необходимой для обнаружения и контроля токсичных веществ в атмосфере, поверхностных и подземных водах, почве и растительности.

В результате проведенных исследований были выявлены общие экологические проблемы полигона «Красный Бор»:

- Прием токсичных отходов (кроме 1- 2 класса опасности) осуществляется в открытые карты, что приводит к их обводнению атмосферными осадками и требует в дальнейшем энергоемкого концентрирования.
- Обезвреживание отходов производится частично, по примитивной технологии, что не дает гарантии получения оптимального результата и стабильности при дальнейшем хранении отходов.
- Термическое обезвреживание производится в слабо регулируемом режиме, без всякой очистки дымовых газов, отличается большой энергоемкостью, поскольку ведутся сжигание разбавленного раствора.
- Не производится очистка слабозагрязненных вод, которые либо обезвреживаются термически, что неэкономично, либо сбрасываются в водоем без очистки.
- Техника сбора в открытые карты и их рекультивации требует большой территории, используемой не эффективно, поскольку при рекультивации 2/3 емкости карт заполняются инертным грунтом.
- При действующей технологии Полигон требует санитарно-защитной зоны радиусом 3 км, причем в СЗЗ попадают населенные пункты, что требует дорогостоящих мероприятий и по защите здоровья населения. Существует потенциальная

опасность перелива содержимого открытых карт катастрофическими последствиями.

### **Разработка комплексной программа системы наблюдений за состоянием окружающей среды**

Формирование геотехногенных систем (например, таких как полигон «Красный Бор») несомненно, вызывает многочисленные трансформации природной среды в целом и отдельных ее компонентов. При изменении режима поведения хотя бы одного из таких компонентов происходит нарушение его экологического равновесия, что может вызвать цепь необратимых последствий и критическое ухудшение состояния всей природной среды.

В 2005 г. по заказу Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга (ответственного за эксплуатацию полигона) Российским государственным гидрометеорологическим университетом была разработана комплексная программа системы наблюдений за состоянием окружающей среды, а также План мероприятий по организации государственного мониторинга окружающей среды полигона «Красный Бор».

Основными принципами, которые легли в основу программы, стали:

- разрабатываемая сеть мониторинга в районе расположения полигона должна предполагать определение приоритетов пространственных аспектов наблюдений по отношению к временным приоритетам (при этом их соотношение должно быть сбалансировано);
- сеть должна обеспечивать возможность расчета качества элементов природной среды (в том числе в разрезе многолетних тенденций);
- частота измерений и измеряемые переменные должны отвечать требованиям анализа временных трендов, а в критические периоды года (ливни, снеготаяние и т.п.) должна существовать возможность уменьшения дискретности наблюдений;
- состав измеряемых переменных не должен ограничиваться реперными загрязнениями, а иметь возможность ориентироваться на конкретную складывающуюся ситуацию;
- продолжительность действия сети должно быть неограниченным или, в крайнем случае, многолетним (десятки лет).

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт №02.740.11.0385 от 30 сентября 2009 г.) по направлению «Переработка и утилизация техногенных образований и отходов».

### **Литература**

1. Отчет о научно-исследовательской работе «Оценка экологического состояния полигона “Красный Бор” с учетом возможности чрезвычайной весенней ситуации 2003 г.» РГГМУ, 2003.
2. Отчет о научно-исследовательской работе «Комплексный анализ влияния полигона “Красный Бор” на экологическое состояние окружающей среды”. РГГМУ, 2004 г.
3. Отчет о научно-исследовательской работе «Оценка снегозапаса, запаса воды и прогноз паводка в районе расположения Полигона «Красный Бор». РГГМУ, 2005 г.
4. «Об отходах производства и потребления». Федеральный закон № 89-ФЗ от 24 июня 1998 г.

5. «Об охране окружающей среды». Федеральный закон № 7 - ФЗ от 10 января 2002 г.
6. Климат Ленинграда // под. ред. Ц.А. Шверц, Е.А. Алтыкиса, Л.С. Евтеевой. Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 251 с.
7. Гигиенические нормативы «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. ГН 2.1.7.2041-06». Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 23.01.2006г. № 1.
8. Гигиенические нормативы «Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. ГН 2.1.7.2042-06». Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 23.01.2006г. № 2.
9. Гигиенические нормативы «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. ГН 2.1.5.1315-03». Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2003г. № 78 (в ред. от 28.09.2007г.).
10. ГН 2.1.5.2280-07 (вместе с гигиеническими нормативами «Дополнения и изменения №1 к ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования»). Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.09.2007г. № 75.
11. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные Правила и нормы. СанПиН 2.1.5.980-00». Утверждены Главным государственным санитарным врачом РФ 22.06.2000г.
12. Санитарно-эпидемиологические Правила и Нормативы «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. СанПиН 2.1.4.1074-01». Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26.09.2001г. № 24.

*А.В. Дикинис, А.В. Илларионов, А.А. Лебедева, Д.В. Шилов, Е.Д. Родионова*

## **УЧЕТ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ**

*A.V. Dikinis, A.V. Illarionov, A.A. Lebedeva, D.V. Shilov, E.D. Rodionova*

## **ACCOUNTING HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS IN THE WORK CYCLE WASTE MANAGEMENT OF PRODUCTION AND CONSUMPTION**

*В данной статье рассматриваются проблемы учета взаимодействия отходов производства и потребления, а также практически не исследованные воздействия условий окружающей среды на опасные компоненты отходов производства и потребления. Предложены к рассмотрению различные климатические условия и их воздействие на изучение и сравнение свойств типовых потоков отходов в регионах. Основными климатическими условиями являются: количество и характер осадков, температурный режим, движение воздушных масс. Так же в рамках данной работы разработаны сценарии возможного развития чрезвычайных (аварийных) ситуаций.*

*Ключевые слова: отходы производства и потребления, условия окружающей среды, гидрометеорологические условия, осадки, температурный режим, воздушные массы, чрезвычайные ситуации, аварийные ситуации.*

*This article addresses the problem of the interaction of industrial and consumer waste, and virtually unexplored impact of environmental conditions on the hazardous components of waste production and consumption. We propose to consider the different climatic conditions and their impact on the study and comparison of the properties of typical waste streams in the region. The main climatic conditions are: the number and nature of precipitation, temperature, movement of air masses. Just in this paper developed scenarios of possible development of contingency (emergency) situations.*

*Key words: waste production and consumption, environmental conditions, meteorological conditions, precipitation, temperature, air mass, emergency, emergencies.*

Проблемы учета взаимодействия отходов производства и потребления мало исследованы в современной научной литературе. Среди источников можно отметить публикации [1, 2, 3, 4]. В них основное внимание уделено проблемам обеспечения экологической безопасности в сфере обращения опасных отходов.

В тоже время практически не исследованы воздействия условий окружающей среды на опасные компоненты отходов производства и потребления.

В настоящей статье сделана попытка указать основные факторы окружающей среды, влияющие на состояние отходов на различных этапах их жизненного цикла.

Очевидно, что во многом степень взаимодействия гидрометеорологических условий определяется как применением современных технологий по транспортировке

различных видов отходов, так и соблюдением существующих нормативных требований к этим процессам.

Основные санитарно-гигиенические, технико-экономические требования к организации мест сбора и к транспортированию твердых коммунальных отходов в Российской Федерации содержатся в санитарных нормах и правилах «Санитарные правила содержания территорий населенных мест» (СанПиН 42-128-4690-88), «Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для ТБО» (СанПиН 2.1.7.1038-01), «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления» (СанПиН 2.1.7.1322-03), «Инструкции по организации и технологии механизированной уборки населенных мест» (от 12 июля 1978 г.) и др. [5].

Несмотря на то, что указанные документы в значительной мере устарели, каждый из них является центральным и основополагающим при организации работ в данной сфере, т.к. согласно им задается перечень обязательных требований.

Одной из основных проблем обращения с отходами производства и потребления является их размещение «под открытым небом», зачастую на необорудованных площадках, с несоблюдением существующих требований, гидрогеологических и гидрометеорологических условий и прежде всего на полигонах размещения как промышленных, так и опасных компонентов твердых бытовых отходов.

Изменение свойств отходов при воздействии окружающей среды можно проследить при изучении и сравнении свойств типовых потоков отходов в регионах с разными климатическими условиями.

*Количество и характер осадков*, поверхностного стока повышенного уровня грунтовых вод в первую очередь влияет на изменение влажности отходов, а как следствие, влияет на плотность, массу, нормативы образования и накопления; химический состав и изменение класса опасности. Наличие излишней влаги в составе отходов выводит из строя металлическое и деревянное оборудование (контейнеры, кузова мусоровозов), используемое на различных этапах технологических циклов обращения с отходами.

*Температурный режим* оказывает влияние на химический состав и изменение класса опасности; процессы биохимического разложения органических компонент в первую очередь в составе отходов потребления.

Процессы биохимического разложения масс отходов приводят к образованию органических и неорганических соединений. Наличие органической составляющей в отходах превращает свалочные массы в источники горючих и вредных газов, отравляющих атмосферный воздух.

*Движение воздушных масс* (ветер) может оказывать влияние на перенос легколетучих компонентов отходов, пыли, токсикантов на большие расстояния, в том числе в городах и населенных пунктах.

Иными экологическими опасностями, связанными со сферой обращения с отходами производства и потребления, являются последствия, обусловленные взаимодействием опасных техногенных объектов (на этапах технологических циклов) с экстремальными природными процессами и явлениями, а также развитие нештатных ситуаций и техногенных аварий, обуславливаемых в том числе «человеческим фактором» и др.

В рамках выполнения настоящей работы на примере полигона «Красный бор» разработаны сценарии возможного развития чрезвычайных (аварийных) ситуаций (таблица 1), которые могут быть классифицированы по двум основным направлениям:

1. *Залповые выбросы* – кратковременные интенсивные выбросы загрязняющих веществ, вызванные причинами техногенного (антропогенного) характера или катастрофическими природными явлениями редкой повторяемости.
2. *Продолжительное воздействие полигона на природную среду* – непрерывное растянутое во времени негативное воздействие полигона на природную среду, обусловленное постоянно протекающими процессами фильтрации, испарения токсичных веществ. Действие процессов носит постоянный характер и в целом зависит от времени года.

Таблица 1

Типы чрезвычайных ситуаций

№ сценария	Тип чрезвычайной ситуации
1.	Перелив содержимого карт-хранилищ токсичных отходов через верхнюю кромку обваловки
2.	Разрушение обваловки карт-хранилищ токсичных отходов
3.	Подземная фильтрация токсикантов из карт-хранилищ токсичных отходов
4.	Попадание загрязненного токсичными веществами поверхностного стока с территории полигона в гидрографическую сеть района
5.	Попадание токсичных веществ в окружающую природную среду за счет атмосферных переносов
6.	Попадание токсичных веществ в окружающую природную среду при возникновении очага возгорания
7.	Попадание токсичных веществ в окружающую природную среду за счет экстремальных метеорологических явлений (смерчи, ураганы, шквалы)
8.	Попадание токсичных веществ на водосбор р. Нева вследствие аварии при их транспортировке на полигон

На рис. 1 представлена графическая схема основных сценариев возможного формирования чрезвычайных (аварийных) ситуаций.

Как видно (см. рис. 1), к развитию ситуации по указанным выше сценариям, может привести следующий набор природных и техногенных процессов и явлений:

1. Редкие природные катастрофические явления:
  - a. смерчи;
  - b. ураганы и шквалы;
  - c. интенсивные (экстремальные) осадки;
  - d. тектонические процессы естественного происхождения;
  - e. падение космических тел (метеоритов и пр.).
2. Продолжительные (частые) природные явления:
  - a. микротрещинноватость пород в районе полигона;

- b. тектонические процессы антропогенного происхождения («наведенные землетрясения»);
  - c. фильтрация грунтовых вод в поверхностном слое почвы;
  - d. образование наледей;
  - e. атмосферное электричество (в том числе мощные грозы);
  - f. воздушные переносы в районе полигона.
3. Техногенные процессы:
- a. аварийные ситуации на полигоне, связанные с технологическими нарушениями при обращении с токсичными отходами и пр.;
  - b. дорожно-транспортные происшествия при транспортировке токсичных отходов в районе полигона;
  - c. падение летательных аппаратов в районе полигона.



Рис. 1 – Графическая схема основных сценариев возможного развития чрезвычайных (аварийных) ситуаций на полигоне «Красный Бор»

При этом перемещение токсикантов от источников в компоненты природной среды может происходить несколькими путями (воздушным, водным, подземным) как отдельно (варианты А, Б и В), так и в некоторых комбинациях (вариант Д).

Следует отметить, что к реализации сценариев одного типа могут приводить различные сочетания событий или факторов.

Учет гидрометеорологических параметров при обращении с отходами производства и потребления требует детального изучения изменения свойств отходов различных типов под воздействием условий окружающей среды. Кроме изменений свойств отходов, под воздействием гидрометеорологических условий могут быть выведены из строя объекты санитарной очистки населенных пунктов, такие как места временного хранения, станции перегруза и полигоны для захоронения отходов. Из-за обильных осадков может быть затруднен доступ к указанным объектам, нарушен график санитарной очистки и возникнуть риск эпидемиологической угрозы для населения.

Количество и характер осадков приводит к наводнениям в поймах рек и как следствие к возможному подтоплению объектов сферы обращения с отходами, расположенных в непосредственной близости от них. Этот фактор в первую очередь необходимо предусматривать при выборе способа захоронения отходов.

Другой регионально-климатический фактор связан с *речным стоком бассейна крупных рек, который объединяет поверхностный сток* (образующийся в результате осадков и снеготаяния) и подземный сток, формируемый за счет грунтовых вод. К сожалению, ряд экологически опасных объектов находится в непосредственной близости к р-екам (в качестве примера можно привести расположенный в 15 км от реки Нева — «Полигон захоронения токсичных отходов «Красный Бор»).

Известно также, что в Москве отсутствует четкая система обращения с опасными промышленными отходами. Специально обустроенных полигонов для захоронения опасных промышленных отходов в Московском регионе нет (кроме спецполигона НПО «Радон» в Сергиево-Посадском районе), поэтому промышленные отходы III – IV класса опасности размещаются на существующих площадках полигонов бытовых отходов, которые расположены на территории Московской области, через которую проходит река Москва. А неутилизированные отходы I – II класса опасности накапливаются на территории предприятий или размещаются несанкционированно.

В большей степени учет этих региональных особенностей необходим в зимний период времени, в связи с формированием опасных ледовых явлений в зимнее время, которые в свою очередь приводят к *наводнениям и паводкам*.

Учет уровня грунтовых вод, поверхностного стока вод крайне необходим при организации и оборудовании полигонов для захоронения отходов.

*Температурный режим, высокие температуры воздуха*, могут привести к возгоранию на полигонах обращения с отходами, так как почти на каждом из них присутствуют высокогорючие и легковоспламеняющиеся вещества. Например, за последние 5 лет на полигоне захоронения опасных отходов «Красный Бор» происходило несколько крупных пожаров (последний в 2011 г.), обусловленных самовозгоранием отходов нефтепродуктов на поверхности карты-котлована с жидкими отходами.

Следует обратить особое внимание на сложность, а иногда и невозможность ликвидировать, локализовать площадь возгорания или уменьшить интенсивность пожара.

При воспламенении высокотоксичных отходов, может происходить неконтролируемое и сложно прогнозируемое увеличение и образование новых групп загрязняющих веществ, в том числе и новых токсинов.

В последние годы активно развивается деятельность, связанная с транспортированием нефтепродуктов, которая влечет за собой риск попадания нефтепродуктов и отходов нефтепродуктов в окружающую среду. При этом риск возникновения природных техногенных катастроф связаны в первую очередь с разливом нефти в акваториях рек, участвовавшими на крупных нефтеперерабатывающих предприятиях.

В этих котлованах содержались в том числе опасные отходы органического происхождения 2 класса опасности (нефтешламы при зачистке резервуаров, всплывающие нефтепродукты, отработанный керосин, отработанные масла, не подлежащие регенерации), 3 класса опасности (всплывающие нефтепродукты нефтеловушек, отработанное промышленное масло, эмульсия от маслотовушек компрессорной, нефтешламы, жидкие отходы с органическим составом, нефтесодержащие воды, собранные с судов) и др.

Очевидно, что крайне необходимо учитывать температурный режим при выборе технологического цикла обращения с отходами, особенно на этапах хранения и захоронения отходов.

Пятый фактор носит эпизодический и экстремальный характер, связанный с участвовавшими влиянием *штормовых условий погоды*.

К экстремальным природным явлениям, как было указано выше способным существенно нарушить функционирование технологических циклов обращения с отходами, в первую очередь относятся наводнения, ураганные и штормовые ветры, количество осадков, превышающее среднегодовую норму, и т.п.

Строительство объектов сферы обращения с отходами необходимо производить с учетом *направления господствующих ветров*. Объекты захоронения отходов, мусоросжигательные заводы следует располагать в подветренной стороне.

### **Выводы**

Несоблюдение санитарных норм и правил на этапах технологических циклов обращения с отходами, в совокупности с изменением условий окружающей среды, во многих случаях влечет за собой экологические угрозы непредвиденного загрязнения природной среды, нарушения функционирования экосистем в связи с возможным попаданием в них большого количества сильнейших экотоксикантов опасности отходов производства и потребления.

Для каждого населенного пункта и опасного объекта в сфере обращения отходов производства и потребления необходим подбор определенных технологий сбора, утилизации и обезвреживания отходов, учитывающих местный опыт, условия и ресурсы. Особое внимание следует обращать на климатические особенности региона при санитарной очистке населенных пунктов.

Использование климатических и гидрометеорологических данных позволяет повысить эффективность планирования и управления санитарной очисткой населенных пунктов, и, соответственно, уменьшение потерь от воздействия неблагоприятных погодных условий, что, в свою очередь, влечет за собой и положительный экономический эффект.

Рекомендации по учету гидрометеорологических условий при организации и проведении работ технологических циклов обращения с отходами производства и потребления в настоящее время отсутствуют. Поэтому нормативные документы и инструкции требуют переработки и корректировки в связи развитием технологий сбора, вывоза и обезвреживания отходов производства и потребления.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт №02.740.11.0385 от 30 сентября 2009 г. и государственный контракт № П154 от 15 апреля 2010 г.) по направлению «Переработка и утилизация техногенных образований и отходов».

### **Литература**

1. *Дикинис А.В., Илларионов А.В., Шилов Д.В., Лебедева А.А.* Аспекты выбора технологий обезвреживания и утилизации опасных отходов. // Экология и промышленность России. Вып. 6, 2010 — М: 2010 — 52-55 с.
2. *Лебедева А.А., Дикинис А.В.* Разработка подходов к оценке жизненного цикла отходов производства и потребления. // Экология урбанизированных территорий. - М.: Издательский дом «Камертон». - №4, 2011 — в печати.
3. *Лебедева А.А.* Индикаторный подход при оценке качества системы обращения с отходами // Экология урбанизированных территорий. - М.: Издательский дом «Камертон». - №1, 2010 — С.63-67.
4. *Яйли Е.А.* Применение методологии риска для управления уровнем экологической безопасности на урбанизированных территориях // Личность, культура, общество. — 2009, выпуск 1-2. — Том 11. — С.310-315.
5. Санитарные правила содержания территорий населенных мест. СанПиН 42-128-4690-88. Утверждены Минздравом СССР 5 августа 1988 г.

# СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

*В.Д. Денисов*

**ГЕРОЙ-ХУДОЖНИК В ПОВЕСТЯХ Н. В. ГОГОЛЯ «ПОРТРЕТ» И  
«НЕВСКИЙ ПРОСПЕКТ» (1835) И В РОМАНТИЧЕСКОЙ ПОВЕСТИ О  
ХУДОЖНИКЕ 1830-Х ГОДОВ**

*V.D. Denisov*

**THE HERO-ARTIST IN THE NOVELLAS «THE PORTRAIT» AND «THE NEVSKY  
PROSPECT» (1835) BY NIKOLAI GOGOL AND THE ROMANTIC STORY ABOUT  
THE ARTIST OF THE 1830S.**

*Статья посвящена превращению типажа героя-художника, характерного для романтизма, фактически в героя-филистера петербургских повестей Гоголя, отражающих апокалиптические тенденции современной ему действительности.*

*Ключевые слова: романтизм, герой-художник, петербургские повести Гоголя «Портрет» и «Невский проспект».*

*This article is devoted the transformation of the hero-artist facial features characteristic of Romanticism, in fact, the hero-philistine of the Petersburg stories of Gogol, reflecting the apocalyptic tendencies of the contemporary reality.*

*Key words: Romanticism, the hero-artist, Gogol's Petersburg novellas «The Portrait» and «The Nevsky Prospect».*

Начало русской романтической литературы на рубеже 1820-1830-х гг. ознаменовано ее всепоглощающим интересом к искусству, унаследованным от «икон» немецкого романтизма [см., например: Вакенродер, 1826]. К середине 1830-х гг. вырабатывается и типаж главного героя-художника, который мы видим в первых петербургских повестях Гоголя. Что же сближает и что разделяет их с известными ему повестями о художнике других авторов?

Исследователи уже делали такие сопоставления, сосредоточив внимание на характерных для романтиков проблемах отношения художника к обществу, искусства к обычной жизни. Пожалуй, в самом общем виде итоги исследования подвел С.И. Машинский: «...и у Н. Полевого, и В. Одоевского, и А. Тимофеева эта проблематика решается в традициях, довольно близких к эстетике немецкой романтической школы, для которой характерно было представление о поэте-художнике, как о вдохновенном

творце, одиноком отшельнике, стоящем над прозаической повседневностью и живущем в мире “высоких” грез и мечтаний. Социальные аспекты этой темы, хотя и были более определенно выражены в повестях Н. Полевого и А. Тимофеева, чем у В. Одоевского, но в целом у писателей романтического направления она решалась в очень общей, абстрактно-гуманистической форме. Противоречия между художником и обществом изображались как извечный конфликт между возвышенной, исключительной личностью и пошлой толпой.

Образ художника взят у Гоголя в совершенно другом – земном, реалистическом ракурсе, он сопряжен с главными социальными проблемами современной действительности» [Машинский, 1971]. Однако следует уточнить, что социальная проблематика «Невского проспекта» и 1-й редакции «Портрета» еще довольно «расплывчата» и вполне соотносима с повестями о людях искусства В. Ф. Одоевского. Не следует преувеличивать и «реалистический ракурс» образов Пискарева и Черткова (так же, как «идеального художника» или художника-монаха) при их сопоставлении с образами художников в «Живописце» Н. А. Полевого и «Художнике» А. В. Тимофеева [Полевой, 1833; Тимофеев, 1834]. От этих повестей «Портрет» и «Невский проспект» отличаются особенностями конфликта и структуры образа героя-художника – как типичной тогда «формы романтического героя» [Манн, 1976]. И если Н. Полевой и А. Тимофеев разрабатывают и типичный романтический конфликт «героя и толпы», то Гоголя занимает смысл этого противостояния и отражение в нем тех или иных тенденций в современном обществе.

Трагическое несоответствие «мечты и существенности» в «Невском проспекте» приводило Пискарева к гибели, но не могло изменить его характера, и он, на первый взгляд, разделял несчастную судьбу героя-художника в повестях Н. Полевого и А. Тимофеева. Но характерное для них прямое противопоставление такого героя обществу, лишь отчасти определяло трагедию Пискарева, ибо обнаруживалось только в его сне, а причиной конфликта выступал разрыв между личностными, «высокими» творческими установками и выработанными «цивилизацией» пошлыми нормами, принятыми в обществе и отчетливо связанными с «антихристовым», разрушительным началом. Трагедия Пискарева отступает от традиционного типа романтического конфликта. Обычно устремления одухотворенного героя уже изначально были противоположны особенностям окружающего пошлого мира, нормам «цивилизации», «обыденному сознанию» и только иногда «мировому злу» [Ванслов, 1966]. Сама позиция героя оказывалась исключительной, способствовавшей его совершенству, и потому общество могло остановить развитие художника, лишь погубив его (как правило – равнодушием и непониманием его искусства), отвергнув, заперев в сумасшедшем доме. Такого противоборства «история Пискарева» не обнаруживает. Ее герой – типичный «петербургский художник», который в глазах общества занимает на социальной лестнице ту же ступень, что и немецкие ремесленники. Встреча с красавицей нарушает зыбкое душевное равновесие героя и приводит к трагедии: он не способен ни совместить прекрасное с порочным, как того требует «цивилизация», ни замкнуться в своем «идеальном мире». Это вызывает действительное помрачение рассудка и самоубийство – как форму отчуждения, не свойственную романтическому типу героя-художника, – он мог впасть в «высокое» безумие [см.: Назиров, 1980] или умереть, но

лишь от неразделенной любви (иными словами, отчуждение должно быть выражено в соответствующих типу героя эстетичных формах). Однако в «Невском проспекте» так же, как в повестях Н. Полевого и А. Тимофеева, трагическая судьба героя показывала, насколько современное ему общество извратило представления о прекрасном.

В повести о художнике его типологические черты были явно связаны с просветительской идеей «естественного человека» в романтическом изводе. Ведь «художник, музыкант, поэт у Вакенродера, у Тика, у Новалиса — это не столько очерченная человеческая фигура, сколько абстракция своей профессии, эстетическая точка зрения на мир и вещи мира, каждый раз названная тем или другим личным именем» [Берковский, 1973]. И хотя герой-художник в упомянутых нами произведениях более конкретен, более социален — для романтиков он тоже представляет, при индивидуальных различиях, тот естественный религиозно-эстетический взгляд на окружающее, что противопоставит господствующему «обыденному сознанию» и соответствует позиции самого автора. Как правило, созданная героем картина воплощает идеал, с его точки зрения, недостающий современности, однако он видит безразличие к своему шедевру большинства зрителей, в том числе и дорогих его сердцу людей. Все это приводит художника к окончательному разрыву с непоэтичным окружающим, после чего он уходит в «идеальный мир» и создает, подобно Вакенродеру и его героям, культ «отшельника, любителя изящного». А невозможность сохранить в мире или возродить прекрасное, гармоничное, Божественное предопределяет и неминуемую гибель художника, и резкую критику губительной для него бездуховной действительности, особенно в ее социальном аспекте.

В «Живописце» Н. Полевого «ни судьба, ни мир, ни люди» не позволяют, как говорит Аркадий, ему быть художником, поскольку он — «сын бедного чиновника, ничтожный разночинец...» [Полевой, 1833, с. 79]. Герой-художник у Тимофеева — незаконнорожденный, крепостной для своих родных — всеми силами пытается преодолеть изначальное отчуждение. «Естественное право» человека и его высшее, «художническое» предназначение взаимосвязаны и — бесполезны, не существенны для действительности. Отстаивая свое призвание наперекор судьбе и эпохе, герой бросает вызов несправедливому миропорядку и терпит поражение, но сам остается идеалом для повествователя, сгорая как «яркий метеор... — единственный человек из этой толпы народа» [Полевой, 1833, с. 374].

Для журнально-альманашной литературы 1830-х годов характерна и принципиально иная точка зрения. Например, была попытка если не примирить, то хотя бы отчасти сгладить противоречия между личностным и общественным, художником и миром в повести В. И. Карлгофа «Живописец». Главный герой его «идиллии» беспрепятственно развивает свой талант, не сомневаясь в его значении для общества, и тем самым утверждает некую «официальную» гармонию петербургского мира. На вопрос о своем счастье он рапортует: «...я живописец — это мое звание в обществе; я семьянин — это почетное достоинство в облагороженном человечестве; работа, любовь жены и счастье детей < — > мои требования, мои желанья в будущем...» [Карлгоф, 1830, с. 64].

Свое призвание он нашел благодаря внезапно вспыхнувшему чувству к дочери известного живописца. Очарованный ей, офицер посещал Академию художеств, вышел в отставку, написал искусный портрет своей возлюбленной и лишь тогда, пред-

варительно заручившись согласием ее отца, женился на бесприданнице. Любовь сделала его художником и семьянином, а потому он «сберег и все мечты, все мнения юношеские...» [Карлгоф, 1830, с. 66]. Мир гармоничен, и любой человек способен найти прекрасное в себе и окружающем. По Карлгофу, всё это подразумевает известный уровень благополучия и просвещенности общества: свой идеал офицер-художник нашел в главном храме столицы – в Казанском соборе, среди «высоких созданий Егорова и Шебуева...» [Карлгоф, 1830, с. 71] (это академики живописи; видимо, под их руководством автор занимался в тех же платных классах Академии художеств, что и Гоголь).

Если одноименную повесть Н. Полевого можно считать своеобразным «ответом» Карлгофу, иначе истолковывающим основные сюжетные ходы и ситуации этой повести, то большего внимания заслуживает его же повесть «Портрет» [Карлгоф, 1832], которую сближают с повестями Гоголя (не только с «Портретом») и название, и определенное сходство мотивов и ситуаций. А поскольку она – видимо, по своей тривиальности – оказалась обойдена вниманием исследователей, стоит изложить ее содержание подробнее.

Итак, главный герой «молодой Люстрин» – *петербургский* «живописец с большим талантом; он внимательно изучал природу и, вдохновенный ею, написал несколько образцовых картин...» (с. 3). К нему обратился «необыкновенно богатый человек» с просьбой написать портрет «недавно умершей... жены» по двум «более карикатурам», нежели портретам: богач хотел, чтобы Поэт-Живописец, каковым он считает Люстрина, угадал и вдохнул душу в изображение, и тогда он его «бесконечно» отблагодарит (с. 4-6). Художник соглашается, но тщетно ждет порыва творчества, ибо «минуты вдохновения к Живописцу, как и Поэту, приходят не часто – надобно иногда долго ждать, искусственно привлекать к себе этих мимолетных гостей...» (с. 3).

Наконец, на исходе третьей недели Люстрин попадает на вечеринку «к давнишнему товарищу», там «за дружескими разговорами, в чаду шампанского, он вспомнил о портрете; ему представилось, что богач, известный в столице своею щедростью, отблагодарит его достойным образом, а это даст ему возможность осуществить свои любимые, так тщательно питаемые им грезы: даст возможность жениться на милой девушке»; в ее любви он был уверен и видел себя в мечтах «известным Живописцем... любимым мужем, добрым отцом – счастливым в детях!» (с. 7-8). Придя домой, он приказывает «человеку... поставить к свету мольберт и растереть ученику краски» (с. 8). И вот момент творчества в изображении Карлгофа: «Сбросив с себя сюртук», художник «вперил взоры на оставленные ему жалкие изображения. Казалось, он придумывал способ извлечь из сих душе не говорящих сложных очертаний – черты первоначальные <...> И хотя голова его была тяжела, грудь горела – но вдохновение было в нем и одушевляло его дарование...

Он взял кисти и начал передавать творимый им идеал холсту. Более и более из-за светлого, но непрозрачного грунта выказывалось милое, поэтическое лицо. Казалось, он чародействовал, ибо так быстро выходило сие лицо: уже жизнь горела на щеках, покрытых цветом нежной, едва расцветшей розы; уже мысль блистала в очах, осененных длинными черными ресницами – и улыбка доброты порхала на устах... из-за которых виднелись красивые зубы. Нега волшебным образом разливалась на лице милым и пленительным,

которое не имело ничего общего с оставленными портретами; только одежда была та же... С чего же писал Художник? Кто был ему оригиналом?» (с. 9-10). — Ср., как Чертков работает над портретом светской девицы: «Кисть бросила на полотно первый туман, художнический хаос; из него начали делиться и выходить медленно образующиеся черты. Он принял весь к своему оригиналу и уже начал уловлять те неуловимые черты, которые самому бесцветному оригиналу придают в правдивой копии какой-то характер, составляющий высокое торжество истины» [Гоголь, 1937, с. 415].

На портрете богач узнает жену, а изумленный художник, «всматриваясь в изображение, им набросанное, поражается странным созданием своим... Поставьте возле его милую Ольгу... и вы скажете, что никогда Живописец не нарисует с нее портрета сходнее; но рассмотрите внимательно оригинал и копию, и вы уверитесь, что ни одна черта ее лица не похожа. Вы уверитесь, что на портрете и другие уста, и другие глаза, и совершенно другое очертание, — но при всем том какая неизъяснимая странность! Ее душа выказывается в очах, блистающих иным огнем; ее усмешка веется на устах, манящих к себе не ее прелестью; ее положение в чуждом ей теле и в наряде, ей не свойственном» (с. 12). Люстрин не хочет отдавать портрета, спорит с богачом и раскрывает «перед ним все свои надежды, все желания, свое необеспеченное положение... любовь свою к Ольге... и наконец историю портрета, им только что написанного, не скрыв, что он походит и не походит на Ольгу» (с. 14-15). Воспользовавшись этим признанием, богач забирает портрет, не позволяя художнику добавить «более ни одной черты», чтобы сходство не исчезло, ибо, по словам богача, он «боится увидеть вместо жены» любимую художником девицу (с. 15). — Ср. эпизод во 2-й ред. «Портрета», когда под кистью Черткова «черты бледной девушки стали... выходить яснее... “Довольно!” — сказала мать, начинавшая бояться, чтобы сходство не приблизилось наконец уже чересчур близко», — и вознаградила художника [Гоголь, 1937, с. 105].

Богач «удалился, и богатый подарок заменил художнику его высокое произведение. Известны ли вам те неприятные ощущения, которые доступны бывают Поэтам и художникам, когда они отдают произведения свои за деньги — посторонним людям? <...> Более грустный, чем довольный богатым подарком, Люстрин сидел, полный думы <...> Подарок богача мог осуществить его надежды; он видел уже цель желаний своих достигнуто <...> Люстрин вышел из своего дома, чтобы сделать необходимые закупки <...> Но устройство его домашнего быта и приобретение подарков для милой Ольги требовало времени, и уже две недели прошли, когда Люстрин, окончив все свои хлопоты, летел к Ольге. ... всё было им забыто: и слава художника, и беседы разгульных шалунов — всё, исключая Ольги и семейственного мира, в котором он мечтал укрыть себя от людей...» (с. 16-19). — Ср. мечты Пискарева о семейной идиллии с «красавицей» в повести Гоголя «Невский проспект».

На даче, где жила «девушка со своею старою матерью», юношу «приняли как милого, давножданного знакомого», хотя, озабоченные скорыми переменами, хозяйки хлопотали о своем «и рассеянно слушали мечтателя», который ничего не замечал (с. 20-21). И лишь когда он сделал предложение, выяснилось, что у Ольги уже есть жених... это «богач, заказавший... портрет умершей жены своей!» (с. 24). Дома Люстрина ждало письмо, где богач еще раз благодарил его за услугу и объяснял, что в ответ захотел стать «посредником в любви» художника, познакомился с Ольгой и

узнал, что сердце ее свободно: Люстрина «любят, как доброго знакомого; уважают, как человека с дарованием, — не более...» Тогда он решил посвататься сам — и получил согласие Ольги. С его точки зрения, юноша «любит как мечтатель-живописец... чуждый идеи наложить на себя вечные узы — узы, могущие остановить свободный порыв... гения» (с. 25-26). Поэтому, в «знак особенного уважения» к такому идеализму, богач посылает художнику еще подарок. «В первом пылу негодования и оскорбленного самолюбия, Люстрин то хотел упиться кровью ненавистного соперника, то думать прекратить свое существование, но друзья присматривали за ним и удержали его от поступков предосудительных и безнравственных, а природа, вмешавшись в дело, уложила его на несколько недель в постель: он вытерпел злую горячку...

Через полгода Люстрин был по-прежнему здоров, по-прежнему пировал с друзьями своими, но смотрел на мир уже другими глазами (ср. историю романтического влюбленного в «Старосветских помещиках» Гоголя. — *В.Д.*); ему стали знакомы и опыты потери сердечные, столько необходимые для гения, ибо они расширяют его полет и умножают силы, по мере неудач житейских.

В часы томлений сердечных из-под кисти художника выходили совершеннейшие картины, исполненные и вдохновения и той грусти, которая сообщается людям при чтении гениальных творений Шекспира и Шиллера. Так высшая степень наслаждения обнаруживается тихою, особенною грустью... Так объясняется сладость слез и вечной тоски о погибшем друге...

Вскоре две из картин его, удостоенные первых призов, были приобретены для известнейших в Европе галерей за дорогую цену, и слава об нем, распространяясь более и более, уподоблялась полному полету орла <...> Воспламененный славою, существуя для Искусства, он уже не принадлежал здешнему миру; он равнодушно мог смотреть на женщину, которая в часы сердечной откровенности, признаваясь в любви своей, вверила ему, что только с ним будет счастлива, — и через день подала другому руку на связь домогильную. Люстрин прощал Ольге ее предательство...

Он посетил Италию, изучил творцов Италианской школы и, возвратясь на родину, еще раз, через много лет, увидел некогда свою Ольгу. Еще раз, в часы доверенности с ее стороны, — он уже не имел никаких сердечных требований ни от одной из женщин, — она сказала ему: «Я бы с вами была счастливой». Он улыбался, но не верил ей... И еще в тот же вечер, на шумном пиршестве с друзьями, которые давали ему праздник, как первому отечественному живописцу, он высоко поднял пенящийся бокал и провозгласил тост в честь Ольги! И он был прав: любовь развила его талант; любовь, познакомив его с верою в непрочность благ земных, заставила жить для славы, но прежде подарила его годом сердечного счастья, а год счастья, хотя и мечтательного, в нашей бедной жизни — весьма много!» (с. 26-30).

Таким образом, в «Портрете» Карлгоф развивал мысль о полной творческой свободе художника, независимости от общества, о плодотворном для его искусства одиночестве «орла, реющего в поднебесном пространстве». Семейные узы слишком тяжелы для таланта, хотя Поэт-Живописец должен сначала испытать страсти обычного смертного: радости и горести, любовь и ненависть, — узнать жизнь, чтобы потом «существовать для Искусства... не принадлежать здешнему миру». И тогда его не изменят ни Италия, ни зависимость от денег. Так, написав портрет «души» умершей

жены богача и наделив её чертами своей любимой девушки, молодой художник рассчитывает на вознаграждение, а значит, в какой-то мере, продает «душу» за деньги, необходимые для будущего «семейственного мира, где он мечтал укрыть себя от людей...». С другой стороны, «сердечные томления» из-за измены девушки приводят к тому, что кисть Люстрина создает «совершеннейшие картины», две из них «были приобретены для известнейших в Европе галерей за дороговую цену» и принесли ему славу и независимость. От радостей чувственного мира художнику остаются пиришества со старыми друзьями.

Идеализируя в своих повестях развитие художника, автор, по существу, оправдывал и возвышал современную жизнь, подобно Ф. В. Булгарину, Н. И. Гречу и другим писателям того же ряда, у которых псевдоромантическая «эстетика действительности» подтверждала высокий уровень просвещения в николаевской России — на фоне «отдельных нетипичных» безобразий, пороков, злоупотреблений, недостатков [Фридлендер, 1961]. Признание действительности «разумной» обуславливало своеобразную философию «маленького человека на своем месте», в отведенных ему общественными рамками, в обособленном от других кругу. Обычно скромность и трудолюбие типичного героя/героини вознаграждались богатством или обеспеченной семейной идиллией, а пороки, особенно гордыня, осуждались и наказывались. Точка зрения Карлгофа простодушно ясна: поскольку искусство — труднейшая работа, то за нее художники — наравне с Выжигиными, квартальными надзирателями, чиновниками и проч. — должны официально получать свою долю общественного «блага». Однако для одухотворенного героя повестей Н. Полевого и А. Тимофеева богатство, семейное благополучие или даже просто общественное признание были невозможны. Ему представлялась нелепой мысль, что «художник есть такой же работник, как слесарь, кузнец, плотник» [Полевой, 1833, с. 109]. Своей трагической судьбой он опровергал миф о «разумной и эстетичной» действительности.

Продолжая эту традицию романтической повести о художнике, «истории Черткова и Пискарева» претендуют на иной уровень обобщения. Сама алогичность и пошлость современного мира, ужасавшая романтиков, у Гоголя получает историческое обоснование и воплощается эстетическими категориями: гротеском, смешением прекрасного и безобразного, ремесленными формами, многообразием банальных суждений об искусстве и т.п. Путь Черткова по сути *противоположен* обычному типологическому развитию романтического героя-художника. В отличие от последнего Черткова губит не противоречие, а соответствие распадающемуся миру, эгоизм ремесла и обогащения, которые обуславливают отчуждение и духовную деградацию героя, а затем сумасшествие и ужасную гибель, лишь «внешне» напоминающие обстоятельства смерти героя-художника. Тот погибал в расцвете сил, мастерства, творческих замыслов, не понятый и не принятый обычными людьми, но погибал непобежденный, тем самым доказывая торжество духа над низменными страстями, свою исключительность. Чертков поступает по законам своего мира и — полностью утрачивает «художническое» начало как типичный «герой своего времени», способный даже на преступления.

Соответственно меняется масштаб изображаемого. Действие «историй» Черткова и Пискарева сразу же ограничено Петербургом начала 1830-х годов, тогда как формирование творческой личности в повестях Н. Полевого и А. Тимофеева про-

слеживалось более-менее подробно, с детства художника, и лишь потом начинался «петербургский период». У Черткова и Пискарева нет «предыстории», нет естественного предшествующего пути (важнейших вех жизни героя-художника), и даже происхождение их неопределенно. Они оба не дорастают до настоящего творчества: Пискарев не имеет законченных работ, кроме нарисованной для персиянина «красавицы», а Чертков, штампуя ремесленные поделки, имитирует искусство, после чего оказывается навсегда творчески не состоятельным. Таким образом, герои предстают недоучками, во многом дилетантами, — в отличие от студентов Академии художеств.

Видимо, Гоголю здесь важен определенный момент развития типического характера, момент, который здесь соотношен с общественным и всемирным развитием, отражает его основные тенденции, обозначает перспективы. Так, несмотря на известные ограничения, данный конфликт «вбирает и синтезирует» противоречия этого культурно-исторического периода. Вместе с тем здесь романтические полюса «герой — толпа», «искусство — обыденная жизнь» теряют абсолютное значение, во многом сглаживаются введенной градацией, будучи переосмыслены в ином плане, нежели в упомянутых повестях о художнике.

Его отличала от «людей толпы» Божественная способность любить: она делала возможным понимание мыслей Создателя и попытки их воспроизвести. Любовь — это постоянное творчество или со-творчество с другим, это созидание особого мира, когда две души сливаются в одну. Поэтому герой-художник воспринимал супружество как духовное родство, а потому представлял семью идиллией с высшим, «райским» блаженством взаимопонимания (подобно Пискареву). Пошло-дисгармоничный мир не давал осуществиться такой мечте, разрушал любовные иллюзии, что приводило героя к окончательному разрыву с бездушным окружающим: если самое высокое естественное и эстетическое чувство остается без ответа или отвергается, если идеал не может быть таковым изначально и нельзя ни на что надеяться, — тогда мир действительно мертв и «неотзывчив», бесполезно и само искусство. «Продажный век» беспощадно разрушает любовь, все возможные духовные проявления, искажает и губит естественное «художническое» начало и саму жизнь героя — как в «Невском проспекте» и «Записках сумасшедшего».

В «истории Черткова» вообще нет любовной коллизии, чье крушение составляло в других повестях основу конфликта. Любовь здесь не может и возникнуть: петербургский мир настолько искажен и раздроблен, а связи людей так неестественны и призрачны, что существование тут каких бы то ни было идеалов и соответствующих им отношений проблематично. Так найденный в лавке портрет Чертков первоначально оценивает как настоящее произведение искусства (хотя оно — даже для неискушенных зрителей! — отталкивающе несовершенно и дисгармонично), ибо герой весьма смутно представляет свой идеал и путь к нему, зато видит все трудности пути. Затем его идеалом постепенно становится «мертвое» золото, и оно захватывает «все чувства» героя. На остальное, что выходит за рамки поденной работы, обогащения у Черткова недостает ни времени, ни сил. Таковы же и заказчики. Они вполне удовлетворены портретами — своими бездушными копиями и не могут даже представить себе иных. Гармония отвергается героями и устройством их мира, которому не нужны природа, архитектура, знаменитые памятники.

Даже если здесь появляется шедевр искусства, он привносится извне, из «чужой земли», где есть прекрасное, и почти не вызывает ответных сильных чувств в омертвевших душах, ибо идеал не выстрадан, не выработан совместными духовными усилиями и потому не способен вызвать катарсис, облегчить и очистить души. Напротив, глубже других потрясенный открывшейся красотой и гармонией, Чертков затем переживет своеобразный антикатарсис: он впадает в ужасную зависть и уничтожает шедевры, пытаясь еще больше нарушить мировую гармонию. Такая ненависть ко всему существу противоположна Божественной любви. Действительность в «Портрете» всё больше определяется подменой красоты, любви, сострадания ближнему на корысть, низменные страсти, вражду и ненависть, отчуждение.

Отсутствие любовной коллизии в истории о том, как талант был погублен пошлым миром, по-своему развивает прямые «исторические» инвективы действительности, свойственные героям Н. Полевого и А. Тимофеева. Например, Аркадий в «Живописце» заявляет: «Тот век, когда художник мог быть художником, потому, что не мог быть ничем другим; когда он мог совершенно, всем бытием своим погрузиться в океан Изящного — золотой век Дюреров и Кранахов, Рафаэлей и Микель-Анджело прошел и не возвратится. Мир забыл уже об этом веке, и художник может существовать ныне только вдохновением страстей: если мне нельзя существовать любовью — художник во мне исчезнет. Других страстей я не знаю: любовь только, одна любовь могла бы вознести меня к великому моему идеалу, назло веку нашему и людям!» [Полевой, 1833, с. 103-104]. По мысли Аркадия, обществу присущи черты «стаи волков, называемых людьми!» [Полевой, 1833, с. 92] и «животные» повадки. Нельзя опуститься до этого, не утратив идеалов и художественного вкуса. Здесь некому сопереживать, некого изображать. Ему вторит герой повести Тимофеева: «Дайте мне человека, которого бы полюбил я! Дайте мне друга. Я напишу вам его портрет, — заочно, — взглянув на него один раз. Его лицо выльется из души моей. Я не стану даже и писать его; сама кисть его напишет. Но малевать этих полулюдей, полужверей... Нет, нет; ни за что на свете!» [Тимофеев, 1834. Ч. II. с. 39].

Вместе с тем различие искусства и ремесла в повести о художнике было обозначено весьма невнятно и непоследовательно, зависело от зрелости героя, настроения, отношения к изображаемому. Он мог написать ради денег портрет генеральши с ослиными ушами, а для души — портрет возлюбленной, и это не влияло на талант, поскольку было так же лично и оригинально, как все, что бы он ни делал. Ремеслом показан труд «официальных» художников, которые способны лишь ученически копировать прекрасное (природу или картины знаменитых мастеров) и обогащаются «беззаконно»: не созидая свой мир. А их восприятие искусства, суждения о прекрасном практически равны восприятию «средних» героев, не-художников, «толпы». То есть искусство и ремесло представляют и две ступени совершенства в творчестве главного героя, и два противоположных взгляда на прекрасное («героя и толпы»), и в какой-то мере прекрасное прошлое, «когда художник мог быть художником», и неэстетичное настоящее. Отчасти это характерно и для «Портрета», но обретает здесь особый смысл, когда автор противопоставляет искусство и ремесло по их историко-эстетической функции, по отношению к природе и человеку.

Так, в «истории Черткова» присущая ремеслу аналитическая тенденция оказывается пагубной для искусства, человека и общества. Отражая «раздробленность» петер-

бургского мира, она бессмысленно-репродуктивна, ибо умножает беспорядок. При этом «дурная портретность» соединяется с меркантильным расчетом: бездушно «клоунируя» изображения людей, Чертков хочет получить все больше денег, а для этого постоянно и тяжело трудится, производя однотипные портреты, затрачивает множество сил и времени, но впустую, так как ничего нового не создает и не познает ни «внешний», ни «внутренний» мир. В этой связи примечателен предсмертный «аналитический» бред сумасшедшего Черткова: «Все люди, окружавшие его постель, казались ему ужасными портретами. Портрет этот двоился, четверился в его глазах... ему чудилось, что все стены были увешаны этими ужасными портретами... Страшные портреты глядели на него с потолка, с полу...» [Гоголь, 1937, с. 425]. То есть аналитическая тенденция обуславливает и омертвление души героя, и неестественные перемены его внешности и возраста, что ведут к сумасшествию и гибели (своего рода «хаосу» души и тела). Следовательно, это проявление дьявольского воздействия на эпоху и характеры людей, увеличивающее хаос и определяющее апокалипсическую перспективу.

Как правило, в романтической повести о художнике его исповедь была важнейшей смысловой, сюжетообразующей основой повествования. То есть оригинальный, «художнический» взгляд героя непосредственно передавался Словом о себе и мире. Так — на фоне «обыденного сознания», разных пошлых суждений о прекрасном, «низости» остальных персонажей — была подчеркнута уникальность таланта главного героя, подтвержден его «художнический» тип и характер конфликта. Причем, несмотря на ту или иную дистанцию между ним и автором, подразумевалась некая исходная близость их позиций: «внутренний мир» художника мог быть доступен лишь художнику.

Но в «истории Черткова» герою фактически не дано слова о себе и мире, хотя первоначально его мысли о ремесле, о страшном портрете, явно близкие автору, представлены в виде несобственно-прямой речи и «внутреннего» монолога. Далее, по мере повествования, автор все больше «отдаляется» от героя: высказывает инвективы в его адрес, судит о поступках, подчеркивает разницу между истинно «художническим» взглядом и формирующимся у героя «взглядом ремесленника». Так, в облике девушки (и других моделей Черткова) повествователь видит, «угадывает» и открывает читателю то, что не доступно герою и что он должен был видеть, если бы стал настоящим художником. Чертков лишается своего слова, права на исповедь, поскольку у него исчезает свое оригинальное, личностное мировосприятие, способность к творчеству, что до конца (даже в сумасшедшем доме!) обязан был сохранять герой-художник.

Итак, различия изобразительного и словесного искусства в «Портрете» принципиальны. Если в «Вечерах» против зла были, как правило, действенны и Слово Божье (проповедь, молитва), и религиозный живописный образ (икона, фреска, картина), то в «истории Черткова» живопись почти не трогает очерстевшие души, над которыми оказывается властен «демон в портрете», способный подменить икону. И его обезвредит только Слово, «рассказ сына художника». Видимо, по Гоголю, живопись в своих «высших», религиозных формах — условная, идеальная — становится «выше» действительности, отдаляясь от ее низких, ремесленных форм, тогда как Слово еще сохраняет свою силу и власть над миром, над душами людей, указывая Истину, не-расторжимо соединяя прошедшее и «сегодняшнее».

**Литература**

1. *Берковский Н.Я.* Романтизм в Германии. Л., 1973. с. 527.
2. <*Вакенродер В.Г.*> Об искусстве и художниках. Размышления отшельника, любителя изящного, изданные Л. Тиком. М., 1826.
3. *Ванслов В.В.* Эстетика романтизма. М., 1966. с. 171-173.
4. *Гоголь Н.В.* Полн. собр. соч.: В 14 т. М., 1937. Т. III.
5. *Карлгоф В.И.* Живописец // Подснежник на 1830 год. СПб., 1830.
6. *Карлгоф В.* Портрет // Повести и рассказы Вильгельма Карлгофа: В 2 ч. СПб., 1832. Ч. 2. с. 3-30; далее в круглых скобках после цитаты указываем номера страниц.
7. *Манн Ю.В.* Поэтика русского романтизма. М., 1976. с. 254.
8. *Машинский С.И.* Художественный мир Гоголя. М., 1971. с. 167-168.
9. *Назирова Р.Г.* Фабула о мудрости безумца в русской литературе // Русская литература 1870-1890-х годов. — Сб. 13. — Свердловск, 1980. с. 94-66.
10. <*Полевой Н.А.*> *Н. П.* Живописец // Московский Телеграф. 1833. №№ 9-12; цит. по изд.: *Полевой Н.* Живописец // Мечты и жизнь: Были и повести, сочиненные Николаем Полевым. М., 1834. Ч. 2.
11. <*Тимофеев А.В.*> Художник, Т.м.ф.а. СПб., 1834. Ч. I-III. По мнению Белинского, книга Тимофеева местами была «слишком заметным подражанием» повести Н. Полевого (Белинский В.Г. Собр. соч.: В 9 т. — М., 1976. Т. I. С. 403).
12. *Фридлиндер Г.М.* Вопросы реализма в творчестве Гоголя 30-х годов // Проблемы реализма русской литературы XIX в. М.; Л., 1961. С. 66.

## Список авторов

*Бакланов Александр Анатольевич*, ст. науч. сотр. Датского Метеорологического Института  
*Барышников Николай Борисович*, д.т.н., проф., зав. каф. гидрометрии РГГМУ (812) 444-82-61  
*Блакитная Полина Александровна*, мл. науч. сотр., каф. метеопрогнозов РГГМУ  
*Бобылев Леонид Петрович*, канд. физ.-мат. наук, директор научного фонда «Нансен-центр»  
*Боровская Оксана Петровна*, асп. каф. метеопрогнозов РГГМУ  
*Ванкевич Роман Евгеньевич*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НИСа РГГМУ (812) 444-41-36  
*Векишина Татьяна Викторовна*, инженер лаб. гидрометрии, асс. каф. гидрометрии РГГМУ  
*Галин Венер Ягафарович*, вед. науч. сотр. ИВМ РАН  
*Гонцов Яков Анатольевич*, аспирант кафедры метеопрогнозов РГГМУ  
*Денисов Владимир Дмитриевич*, канд. фил. наук, доц. каф. русского языка РГГМУ  
*Дикинис Александр Владиславович*, к.г.н., доцент каф. ДАКЗ РГГМУ  
*Драбенко Вадим Анатольевич*, к.э.н., доцент, зав. кафедрой РГГМУ  
*Егоров Александр Дмитриевич*, д.ф.-м.н., зав. каф. высшей математики и теоретической механики, ст. науч. сотр. РГГМУ  
*Заболотских Елизавета Валериановна*, ст. науч. сотрудник, к.г.н. научно-исследовательский сектор (НИС)  
*Илларионов Александр Васильевич*, зав. лаб. водных исследований, доцент каф. гидрометрии РГГМУ  
*Коротыгина Ульяна Евгеньевна*, инженер каф. гидрологии суши РГГМУ  
*Кузьмин Вадим Александрович*, д.т.н., зав. каф. гидрогеологии суши РГГМУ  
*Курганский Александр Ростиславович*, аспирант кафедры метеопрогнозов РГГМУ  
*Лебедева Анастасия Андреевна*, ассистент каф. прикладной экологии РГГМУ  
*Макин Иван Сергеевич*, студент каф. гидрологии суши РГГМУ  
*Малинин Валерий Николаевич*, д.ф.-м.н., проф. каф. ПО и ОПВ РГГМУ  
*Мостаманди Сулейман Вахидович*, заведующий бюро прогнозов РГГМУ  
*Моцаков Максим Анатольевич*, зав. лаб. кафедры метеопрогнозов РГГМУ  
*Ошуркова Ангелина Андреевна*, студент каф. высшей математики и теоретической механики РГГМУ  
*Потапова Ирина Александровна*, к.ф.-м.н., доц. каф. физики РГГМУ (812)224-06-97  
*Поташко Евгений Александрович*, магистр каф. гидрометрии (812) 444-82-61  
*Ржонсницкая Юлия Борисовна*, к.ф.-м.н., доц. каф. физики РГГМУ (812)224-06-97  
*Родионова Екатерина Дмитриевна*, инженер НИС РГГМУ  
*Ронту Лаура*, науч. сотр. Финского Метеорологического Института  
*Румянцев Денис Юрьевич*, студент каф. гидрологии суши РГГМУ  
*Саноцкая Надежда Александровна*, к.ф.-м.н., ст. препод. кафедры математики  
*Сергеенко Софья Юрьевна*, студент каф. гидрологии суши РГГМУ  
*Скоморохова Екатерина Михайловна*, магистрант каф. гидрометрии РГГМУ  
*Смышляев Сергей Павлович*, доктор физ.-мат. наук, проф. каф. метеорологических прогнозов РГГМУ  
*Соболев Максим Викторович*, аспирант каф. гидрометрии РГГМУ  
*Субботина Елена Сергеевна*, к.г.н., доцент каф. гидрометрии РГГМУ (812)444-82-61  
*Сурков Александр Георгиевич*, аспирант каф. гидрологии суши РГГМУ  
*Суходолов Тимофей Владимирович*, магистрант научно-исследовательский сектор (НИС) РГГМУ  
*Филиппенко Анна Павловна*, магистрант каф. метеопрогнозов РГГМУ  
*Хорева Екатерина Игоревна*, мл. науч. сотр., каф. метеопрогнозов РГГМУ  
*Шевчук Олег Игоревич*, к.г.н., ассистент каф. гидрологии суши РГГМУ  
*Шеманаев Кирилл Владимирович*, студент каф. гидрологии суши РГГМУ  
*Шилов Дмитрий Владимирович*, инж. лаборатории водных исследований РГГМУ

### **Требования к представлению и оформлению рукописей для авторов журнала**

1. Материал, предлагаемый для публикации, должен являться оригинальным, неопубликованным ранее в других печатных изданиях. Объем статьи может составлять до 1,5 авторских листов (1 а.л. равен 40 тыс. знаков), в исключительных случаях по решению редколлегии – до 2 авторских листов.
2. На отдельной странице приводятся сведения об авторе (авторах) на русском и английских языках: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность и место работы, контактные телефоны, адрес электронной почты. Плата за опубликование рукописей с аспирантов не взимается.
3. Аннотация статьи объемом до 7 строк на русском и английском языках не должна содержать ссылок на разделы, формулы, рисунки, номера цитируемой литературы.
4. Список литературы должен содержать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок.
5. Пронумерованный список литературы (в алфавитном порядке, сначала на русском, затем на иностранных языках) приводится в конце статьи на отдельной странице с обязательным указанием следующих данных: для книг – фамилия и инициалы автора (редактора), название книги, место издания (город), год издания; для журнальных статей – фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, год издания, том, номер, выпуск, страницы (первая и последняя). Разрешается делать ссылки на электронные публикации и адреса Интернет с указанием всех данных.
6. Оформление ссылок в тексте: в квадратных скобках [ ] указать порядковый номер литературы. Если при цитировании делается ссылка на конкретную цитату, формулу, теорему и т.п., следует указывать номер страницы: [13, с. 23].
7. Сноски помещаются на соответствующей странице текста.
8. Таблицы и другие цифровые данные должны быть тщательно проверены и снабжены ссылками на источники. Таблицы приводятся в тексте статьи, номер и название указываются над таблицей.
9. Названия зарубежных компаний приводятся в тексте без кавычек и выделений латинскими буквами. После упоминания в тексте фамилий зарубежных ученых, руководителей компаний и т.д. на русском языке, в полукруглых скобках приводится написание имени и фамилии латинскими буквами, если за этим не следует ссылка на работу зарубежного автора.

**Рекомендации по форматированию  
для подачи рукописи в редакционно-издательский отдел**

Формат А5 (148×210) книжный.

Поля: верхнее – 1,8 см; нижнее – 2,3 см; левое – 1,8 см; правое – 1,8 см.

От края до верхнего колонтитула – 0 см, до нижнего колонтитула – 1,8 см.

Колонцифры внизу в зеркальном положении – 10, обычным шрифтом, начинать с титульного листа.

Набрать текст шрифтом Times New Roman, обычный.

Межстрочный интервал – одинарный.

Абзацный отступ – 0,75 см.

Интервал до заголовка – 24 пункта, после – 6.

Размер шрифта: основной текст – 11, таблицы – 9.

Лежачие таблицы поместить в отдельный файл на формат А5 альбомный, поля: верхнее, нижнее и правое – 1,8 см, левое – 2,3 см, шрифт – 9.

Рисунки располагать по тексту в соответствии со ссылкой.

Подрисуючную подпись набрать шрифтом – 9.

В формулах русские буквы прямые, латинские – курсивные, греческие – прямые, тригонометрические функции (sin, cos и др.) набирать прямым шрифтом.

Литература – шрифт 9.

Оглавление поместить в конце рукописи – шрифт 9.

**Требования к оформлению статьи для публикации в Ученых записках**

Инициалы и фамилии авторов на русском языке.

Название на русском языке.

Аннотация на русском языке.

Ключевые слова на русском языке.

Инициалы и фамилии авторов на английском языке.

Название на английском языке.

Аннотация на английском языке.

Ключевые слова на английском языке.

Формат 17×24 книжный.

Поля зеркальные: верхнее и нижнее – 2,3 см; левое и правое – 1,8 см.

От края до верхнего колонтитула и нижнего колонтитулов – 1,8 см.

**Внимание!**

Авторская правка в верстке – компенсационная, до пяти буквенных исправлений на странице.

Научное издание

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ  
РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
№ 22

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

*Редакторы:* И.Г. Максимова, О.С. Крайнова

*Компьютерная верстка:* Ю.И. Климов

ЛР № 020309 от 30.12.96.

---

Подписано в печать 15.12.11. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,7. Тираж 500 экз. Заказ № 91.  
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.  
Отпечатано в ЦОП РГГМУ

---

---

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС2-8484 от 07 февраля 2007 г.  
в Управлении Федеральной службы в сфере массовых коммуникаций  
и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу  
Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет

---