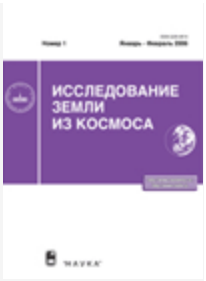
Название журнала	ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА
Издательство	Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука"
Сведения о переименовании и переводе	Переводная версия: Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics Earth Observation and Remote Sensing



Год выпуска	2012	Том		Номер выпуска	4

	Название статьи	Страницы	Цит.
	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ		
	ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЙ И ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД НА ГЕЛЕНДЖИКСКОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.	3	33
	АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА АРКТИКИ В ПЕРИОД ЛЕТНЕГО МИНИМУМА 2011 Г Платонов Н.Г., Мордвинцев И.Н., Рожнов В.В., Алпацкий И.В.	12	3
	НАБЛЮДЕНИЕ ПРОСАДОК ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В РАЙОНЕ ПОДЗЕМНЫХ УГОЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК КУЗБАССА ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ALOS PALSAR Эпов М.И., Миронов В.Л., Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Захарова Л.Н., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В.	26	4
	ЭМИССИИ ОКИСИ УГЛЕРОДА ЛЕТОМ 2010 Г. В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СРЕДНЕРУССКОЙ РАВНИНЫ И ОЦЕНКА ИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ КАРТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ Сафронов А.Н., Фокеева Е.В., Ракитин В.С., Юрганов Л.Н., Гречко Е.И.	30	5
	ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА		
	ПОИСК ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЦ KATRINA ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Покровская И.В.	47	7
	СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ФТОРИСТОГО ВОДОРОДА В АТМОСФЕРЕ Поляков А.В., Тимофеев Ю.М.	57	3
	ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ НАКЛОНОВ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЛН ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ Караев В.Ю., Панфилова М.А., Баландина Г.Н., Чу К.	62	4
	ОБЗОРЫ		
	АЭРОФОТОРАЗВЕДКА. ПРОШЛОЕНАСТОЯЩЕЕБУДУЩЕЕ Матиясевич Л.М.	78	1
	ХРОНИКА		
	ПРОБЛЕМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕМЛИ НА XXXVI КОРОЛЁВСКИХ ЧТЕНИЯХ Зуева В.В.	85	0
	ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ “ПЕРСПЕКТИВЫ ЧЕРНОГО МОРЯ” Митягина М.И.	89	0

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 3–11

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЙ И ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД НА ГЕЛЕНДЖИКСКОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

© 2012 г. В. Г. Бондур[1]*, В. Е. Воробьев[1], Ю. В. Гребенюк[1], К. Д. Сабинин[1], А. Н. Серебряный[2]

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС" Министерства образования и науки Российской Федерации и Российской академии наук, Москва

[2] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева Российской академии наук, Москва

** E-mail: vgbondur@aerocosmos.info*

Поступила в редакцию 02.02.2012 г.

В статье рассматриваются результаты исследований полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря по данным, полученным при гидрофизических измерениях и обработке космических изображений. По результатам измерений, выполненных с помощью буксируемого акустического профилометра, выявлена сильная пространственная и временная изменчивость полей приповерхностных течений, установлено влияние глубоководного стока на динамику прибрежных вод, исследованы характеристики приповерхностного загрязнения морской воды под воздействием заглубленного сброса. По результатам анализа космических изображений высокого пространственного разрешения выявлены мелкомасштабные оптические неоднородности морской среды, вызванные интенсивным антропогенным воздействием непосредственно на акваторию Геленджикской бухты, а также поверхностное проявление воздействия заглубленного стока на прибрежную акваторию, определен ареал распространения факела загрязнений.

Ключевые слова: аэрокосмический мониторинг, поля течений, вихри, придонная конвекция, звукорассеивающие слои, акустический профилометр, глубоководный сброс, загрязнение вод, Черное море

ВВЕДЕНИЕ

Особенности циркуляции вод Черного моря изучены достаточно хорошо на основе проведенных гидрологических исследований (Комплексные исследования..., 2002; Титов, 2002), а также по результатам спутникового мониторинга (Бондур, 2004; Лаврова и др., 2011). Сочетание особенностей топографии дна, циркуляции морских вод и воздушных потоков в районе северо-восточного побережья Черного моря определяет высокую интенсивность динамических процессов в море и атмосфере, характерных для этого района. Главные особенности циркуляции вод Черного моря определяет Основное Черноморское течение (ОЧТ), которое характеризуется высокой гидродинамической неустойчивостью (Титов, 2002). Неустойчивость ОЧТ приводит к образованию вихревых структур различных масштабов в шельфовой зоне Черного моря (Комплексные исследования..., 2002; Титов, 2002), среди которых особый интерес представляют пока еще недостаточно изученные прибрежные мелкомасштабные вихри, играющие важную роль в распространении загрязнений берегового происхождения (Бондур и др., 2009, 2011а, 2011б).

Интенсивное освоение шельфа Черного моря, быстрый рост приморских городов, курортных объектов и, в особенности, массовая коттеджная застройка побережья приводят к значительному усилению антропогенных воздействий на прибрежную экосистему этого региона. Основными источниками поступления загрязняющих веществ в морскую среду шельфа Черного моря являются малые реки, ливневые стоки и стоки бытовых вод через заглубленные коллекторы вблизи городов и поселков, а также места якорных стоянок, где сбрасываются в море технологические воды и зачастую сбрасываются нефть и нефтепродукты (Техногенное загрязнение и процессы..., 1996; Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур, 2004; Лаврова и др., 2011). Ряд промышленных предприятий, расположенных на побережье этой акватории, сбрасывает загрязненные воды непосредственно в море без очистки, а некоторые из источников загрязнения, такие, например, как ливневые стоки в г. Геленджик, вообще не контролируются (Техногенное загрязнение и процессы..., 1996). Все это

сильно ухудшает качество морской воды у побережья Черного моря и снижает ценность этой важнейшей для России рекреационной зоны.

Поэтому исследование полей течений и анализ распространения антропогенных загрязнений в данной акватории с использованием подспутниковых и космических данных представляются актуальными и важными для выявления и устранения источников поступления загрязняющих веществ в морскую среду.

Важную роль в решении подобных задач играют современные аэрокосмические методы и средства, которые эффективны для оценки антропогенных воздействий на прибрежные акватории, в том числе путем измерения цветовых характеристик водной среды со спутников (Бондур, 2004; Bondur, 2011). Наиболее достоверную информацию о локальном загрязнении прибрежных вод, обусловленных сбросами от отдельных предприятий и из очистных сооружений, а также выносом малых рек, предоставляют многоспектральные данные, полученные при аэрокосмическом мониторинге с высоким пространственным разрешением в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005; Bondur, 2011).

В настоящей работе приведены результаты анализа экспериментальных данных по характеристикам полей течений и распространению загрязняющих веществ при сбросе загрязненных вод из заглубленного коллектора в акваторию прибрежной зоны Черного моря вблизи г. Геленджик. Эксперименты проводились с использованием погружаемых приборов: CTD-зонда (Conductivity, Temperature and Depth Sounder), акустических профилометров и температурных датчиков. Кроме этого, проводились съемка с борта космического аппарата IKONOS и обработка полученных многоспектральных изображений высокого пространственного разрешения.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИМ ДОПЛЕРОВСКИМ ПРОФИЛОМЕТРОМ

В 2008–2011 гг. на Черноморском шельфе вблизи г. Геленджик были проведены исследования полей течений и параметров морской среды в районе расположения сбросового устройства (рис. 1). При проведении исследований использовался комплекс гидрофизической аппаратуры, включающий CTD-зонд, заякоренную термистерную гирлянду и распределенный датчик температуры (Коняев, Сабинин, 1973), буксируемый и донный акустические профилометры течений (ADCP). С помощью этих приборов была исследована временная и пространственная изменчивости полей течений, температуры, плотности и солености морской воды, а также получены оценки степени загрязнения прибрежных вод на различных участках исследуемой акватории. Определены характеристики мелкомасштабной изменчивости полей течений и оценено влияние глубоководного стока вблизи г. Геленджик на динамические процессы, связанные с загрязнением прибрежной акватории. Сброс бытовых и технических вод у г. Геленджик осуществляется по заглубленному трубопроводу, длина которого составляет ~2 км, а его выходной конец расположен на глубине ~30 м. Наблюдениями дайверов выявлено, что трубопровод имеет серьезные повреждения. Это подтверждается проверками, проведенными природоохранными службами.

При выполнении экспериментов с помощью буксируемого за моторной яхтой профилометра ADCP измерялись три составляющих вектора поля течений и интенсивность обратного рассеяния звука (ЗРС). Регистрация данных проводилась на различных горизонтах в диапазоне глубин 0.8–64 м с шагом 0.5 м и временной дискретностью 0.8 с. Измерения были выполнены 1, 4 и 10 октября 2009 г. на галсах, показанных на рис. 2*а–в*. Измерения характеристик течений и интенсивности рассеянного акустического сигнала проводились также с помощью донного профилометра, установленного вблизи конца трубопровода с 29 сентября по 11 октября 2011 г.

Для снижения уровня шумовых выбросов в исходных данных акустического профилографа ADCP проводилось усреднение 10 соседних отсчетов, и для дальнейшей обработки использовались данные с временной дискретностью 8 с, что при скорости движения яхты 2 м/с соответствует пространственному разрешению 16 м. С помощью программы Surfer строились векторные карты полей течений в координатах долгота–широта для исследования особенностей скоростей течений в различных участках шельфа, а также оценки влияния заглубленного стока на загрязнение прибрежной акватории.

На рис. 3, 5 и 6 приведены векторные карты осредненных по глубине (баротропных) течений и карты обратного рассеяния акустического сигнала, построенные по данным измерений 1, 4, 10 октября 2009 г., которые отражают сильную изменчивость полей течений и концентрации загрязняющих веществ в исследуемом районе. При этом следует отметить, что интенсивность ЗРС довольно хорошо характеризует степень загрязненности вод. Проанализируем эти карты подробнее. По данным измерений, выполненных 1 октября 2009 г. (рис. 3*а*, *б*), в западной и юго-восточной частях исследуемого района наблюдались течения со скоростями до 10–15 см/с, направлен-

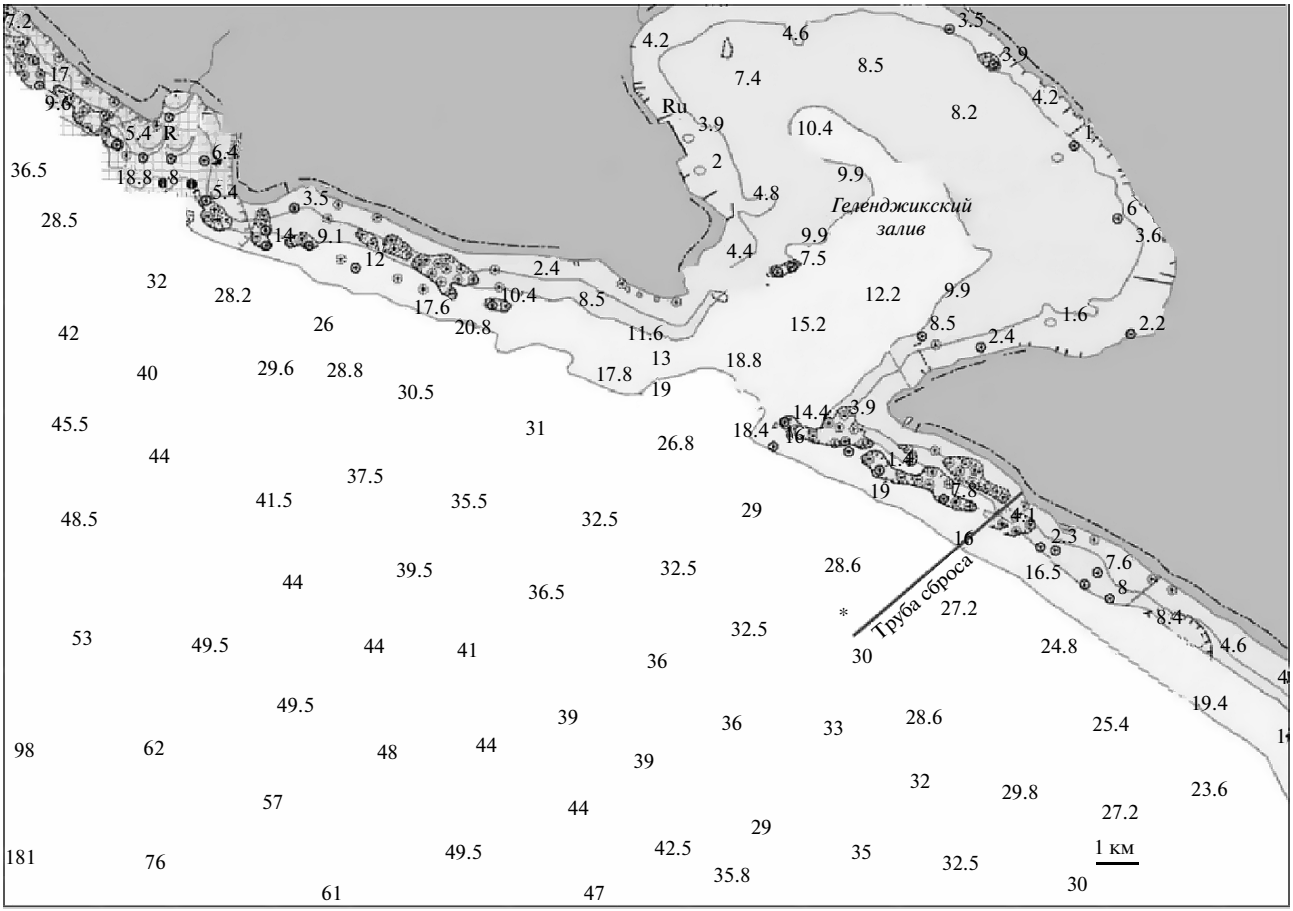


Рис. 1. Карта и космическое изображение района проведения гидрофизических измерений в акватории Черного моря вблизи г. Геленджик (показано сбросовое устройство загрязняющих вод).

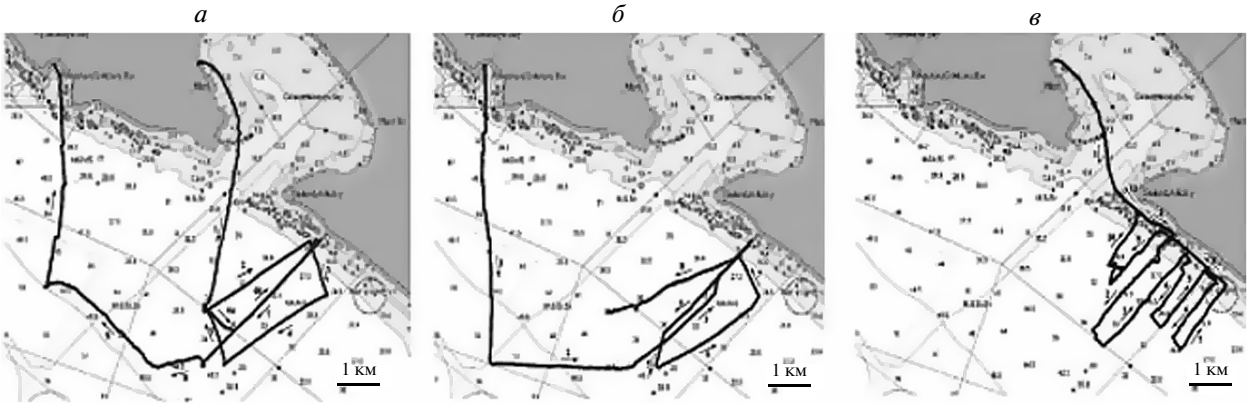


Рис. 2. Схемы галсов, выполненных на Геленджикском шельфе с помощью буксируемого ADCP: *а* – 1 октября, *б* – 4 октября, *в* – 10 октября 2009 г.

ные преимущественно в восточном направлении. В то же время к северу и северо-западу от сбросового устройства доминировали течения, направленные на север и северо-запад (СЗ). В центральной части исследуемого района к СЗ от трубопровода наблюдается область ослабленных и беспорядочных течений с явными признаками дивергенции потоков, в которой можно обнаружить проявление небольшого вихря с диаметром около 4 км, по-видимому, связанного с всплыванием пресных загрязненных вод, которые сбрасываются в море по заглубленному трубопроводу.

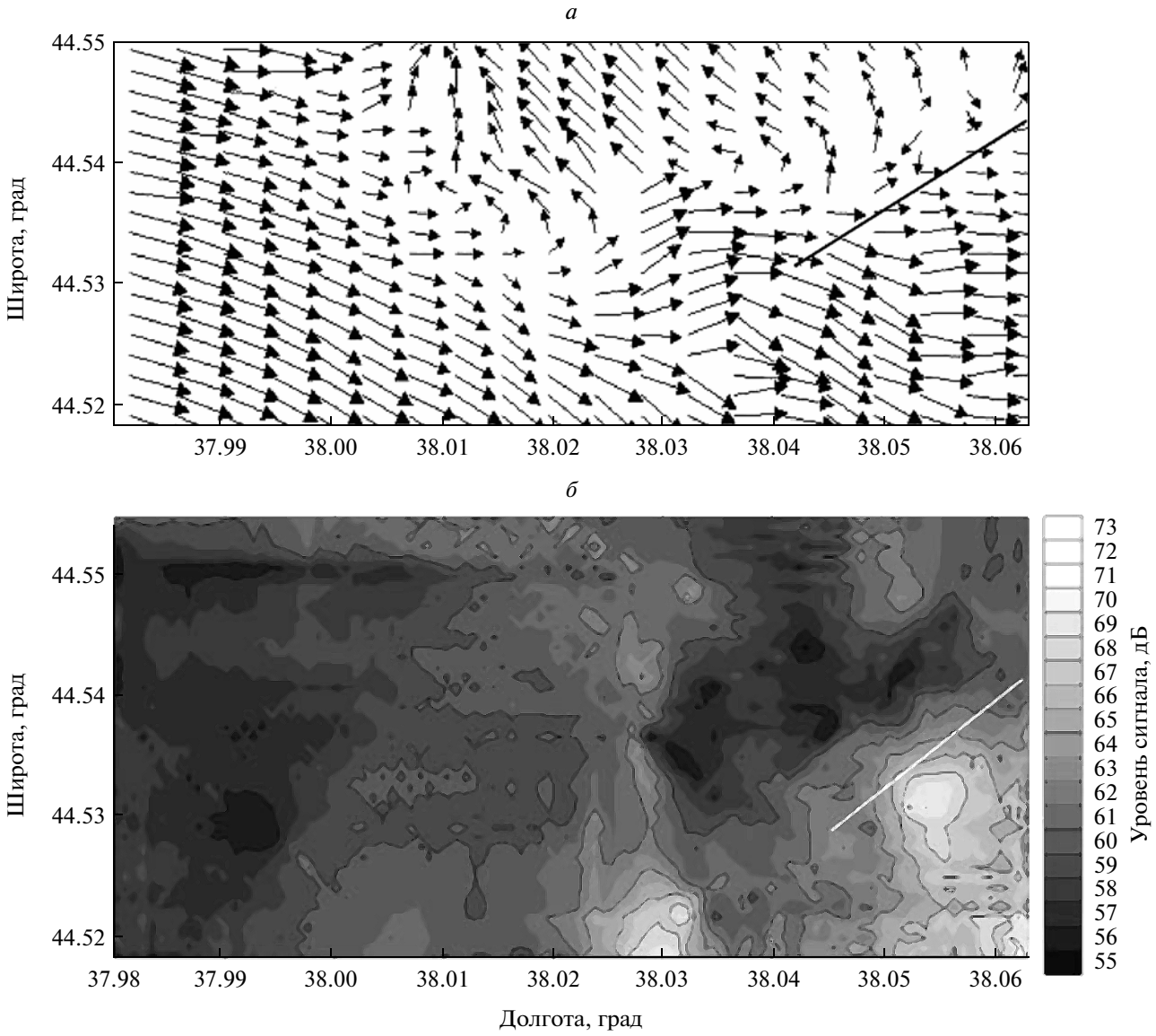


Рис. 3. *а* – Карта векторов баротропных течений по данным измерений 1 октября 2009 г.; *б* – карта уровня обратного рассеяния акустического сигнала в дБ. Справа указаны градации акустического сигнала в дБ. Положение сбросового устройства показано белой линией.

Повышение концентрации загрязнения в центральной части района, проявляющееся на карте уровня обратного звукорассеивающего сигнала (см. рис. 3*б*), согласуется с таким предположением. Пятна наибольшей концентрации загрязняющих веществ находятся, однако, не в центральной части района, а вблизи средней части трубопровода, в 1.6 км к западу от ее конца. Некоторое несоответствие положения пятен интенсивных ЗРС той картине, которая должна была бы сформироваться при всплывании сбрасываемых пресных вод от конца трубопровода и переносе их баротропными течениями (см. рис. 3*а*), можно объяснить следующим образом. Самое интенсивное пятно у средней части трубопровода, где течения были слабыми, по-видимому, связано с истечением воды из отверстий в проржавевшем трубопроводе. Положение пятна загрязнения к западу от конца трубопровода, на наш взгляд, тоже связано со сбрасываемыми водами. При этом следует учитывать, что вытекающие воды обладают некоторым импульсом, направленным, как и трубопровод, на юго-запад. Этим и объясняется смещение пятна в указанном направлении, что подтверждается наблюдениями ЗРС на разрезах над трубопроводом (см. рис. 4 на цветн. вклейках).

Следует отметить, что карты баротропных течений не всегда позволяют хорошо оценивать перенос сбрасываемых вод, поскольку реальные течения меняются с глубиной, а время всплывания

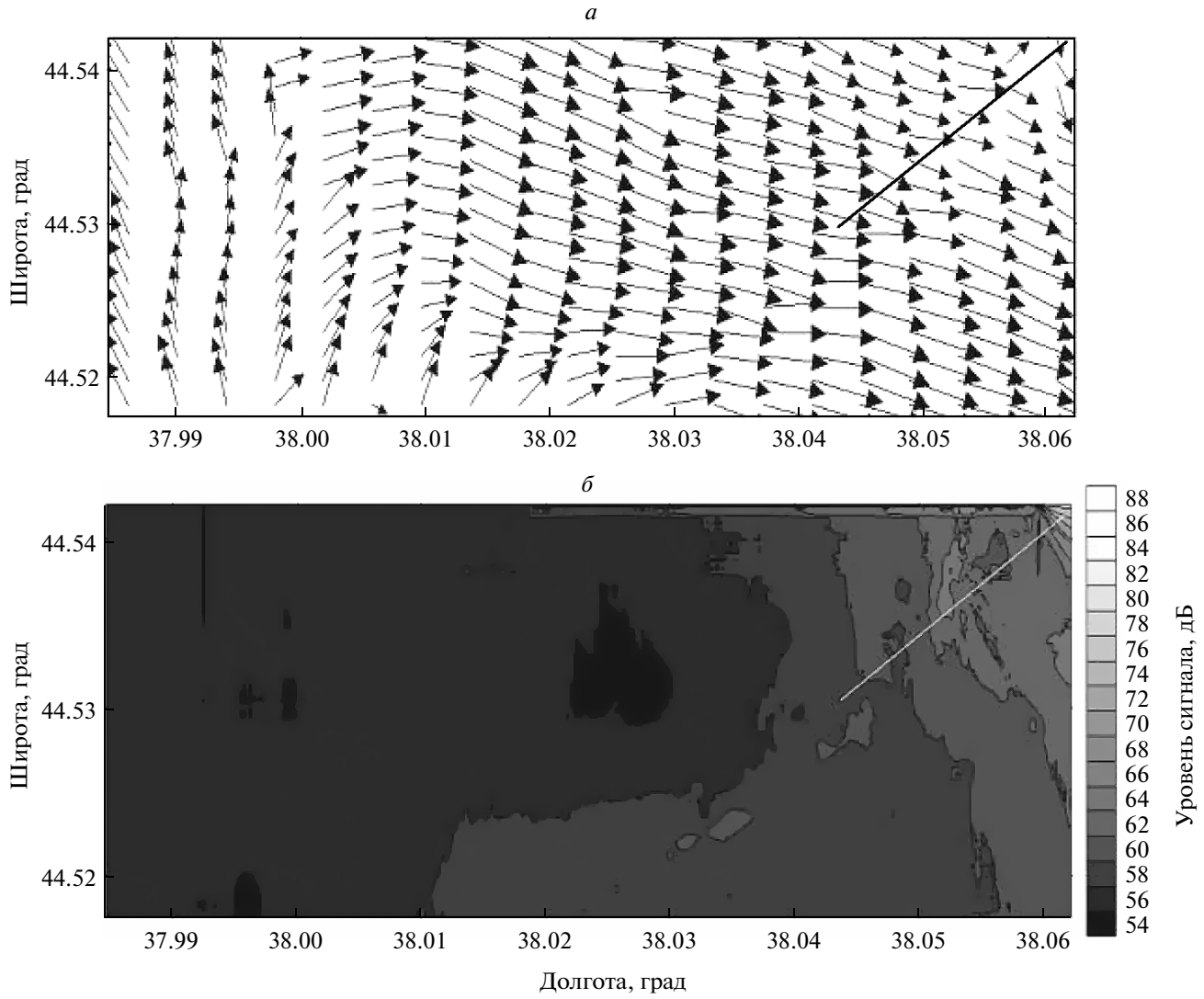


Рис. 5. *а* – Карта векторов баротропных течений по данным измерений 4 октября 2009 г.; *б* – карта уровня обратного рассеяния акустического сигнала в дБ. Справа указаны градации акустического сигнала в дБ. Положение трубопровода глубоководного стока показано белой линией.

этих вод к поверхности моря не настолько мало, чтобы пренебрегать временной изменчивостью течений. Так, при типичной скорости всплывания пресной воды, составляющей 1 см/с, вода с глубины 30 м поднимается за 50 мин. На картине эхолокационного контраста (интенсивности ЗРС), по данным измерений, выполненных 1 октября 2009 г., над трубопроводом (см. рис. 3*б*) хорошо заметен язык повышенной интенсивности, поднимающейся от конца трубопровода на глубине 30 м в сторону открытого моря. Такая картина соответствует всплыванию струи, вытекающей из трубопровода со значительной скоростью. Вертикальные факелы повышенной интенсивности ЗРС, поднимающиеся со дна на меньших глубинах, указывают на просачивание сбрасываемых вод через отверстия в трубопроводе (см. рис. 4).

Анализ векторной карты поля течений, построенной по измерениям, выполненным 4 октября 2009 г. (см. рис. 5*а*), свидетельствуют о кардинальном изменении циркуляции прибрежных вод под действием пришедшего в этот район крупномасштабного антициклонического вихря. Около сбросового устройства установилось сильное однородное течение в восточном направлении, и лишь в северо-восточном углу карты наблюдаются ослабление течений и поворот потока к югу, что, скорее всего, связано с влиянием сбрасываемых вод, истекающих из одного из отверстий в трубопроводе. Увеличение интенсивности ЗРС в этом месте (см. рис. 5*б*) подтверждает такое предположение. На рис. 5*б* можно заметить пятна несколько более слабой, но все же значительной интенсификации ЗРС (~70 дБ) вблизи

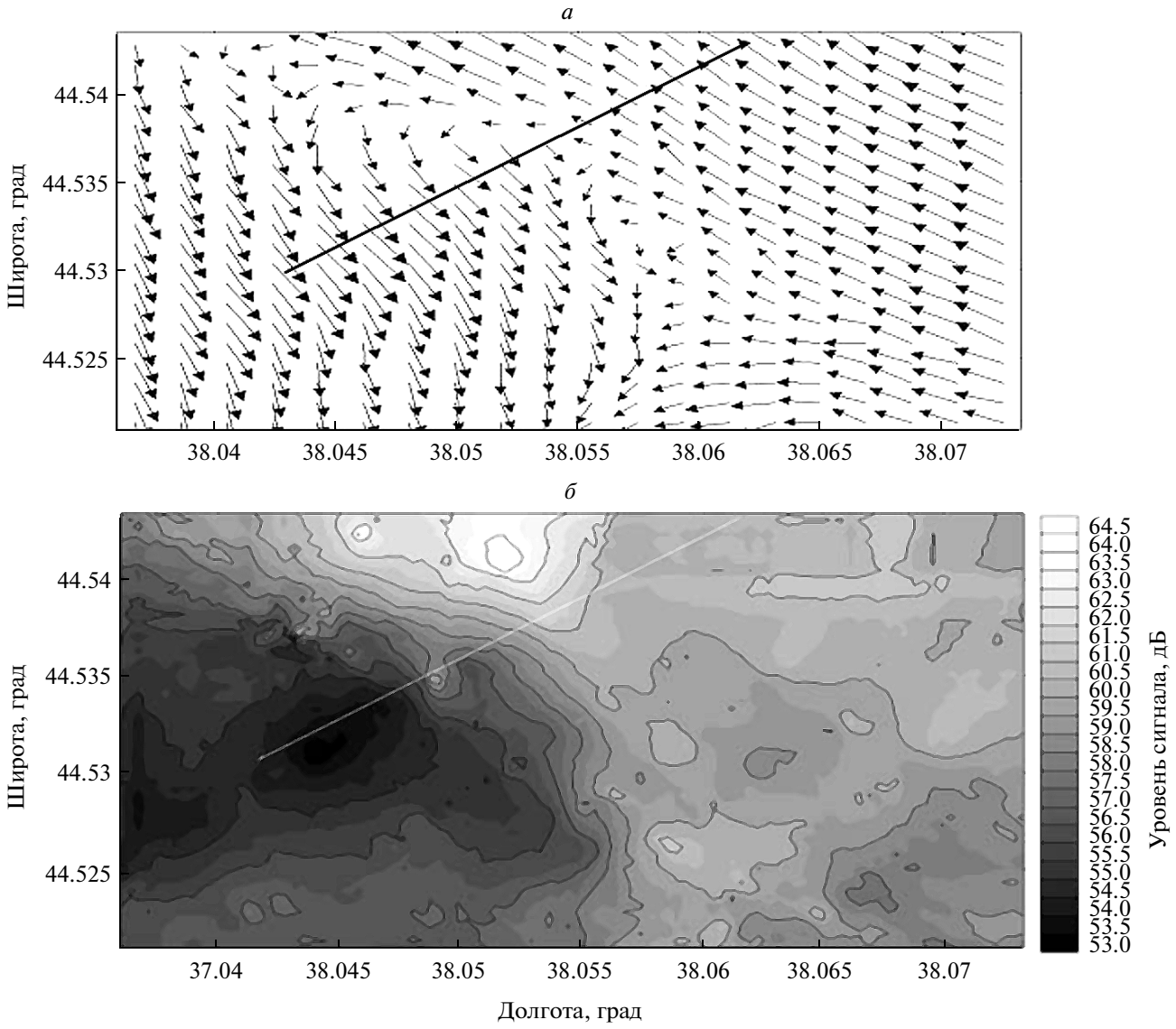


Рис. 6. *а* – Карта векторов баротропных течений 10 октября 2009 г.; *б* – карта уровня обратного рассеяния акустического сигнала в дБ. Положение трубопровода глубоководного стока показано белой линией.

середины и конца трубопровода, а также в 1.7 км к юго-западу от него. Отметим, что концентрация ЗРС в хорошо выделявшихся пятнах 1 октября 2009 г. (рис. 3*б*) была не выше.

10 октября 2009 г. в прибрежной зоне (северо-восточная часть, рис. 6*а*) было выявлено интенсивное течение вдоль берега преимущественно северо-западной направленности. В более глубокой юго-западной части исследуемого участка акватории (см. рис. 6*а*) было зарегистрировано не менее интенсивное течение юго-восточной направленности с циклоническим завихрением у средней части трубопровода. Анализ карты загрязнения поверхностных вод (рис. 6*б*) показывает, что немного к северу от середины трубопровода наблюдается пятно максимальной интенсивности ЗРС, которое, как и сам вихрь, скорее всего, связано со струей сбрасываемых вод, просачивающихся через одно из отверстий в проржавевшем трубопроводе и переносимых к северо-западу течением. К юго-востоку от середины трубопровода наблюдается еще одна область повышенной интенсивности ЗРС, по-видимому, связанная с истечением сбрасываемых вод из другого отверстия, находящегося в зоне влияния потока противоположного, юго-восточного направления. Каких-либо проявлений основной струи сбрасываемых вод, вытекающих из концевого отверстия трубопровода, на рис. 6*б* не обнаруживается. Возможно, эти воды достигают поверхности за пределами обследованного полигона.

Анализ полученных данных показывает, что обнаруживается вполне определенная связь между неоднородностями в поле приповерхностных ЗРС и течениями. Причем как в отношении положения пятен повышенной интенсивности ЗРС, переносимых течением из отверстий в трубе, так и в отношении локальных неоднородностей самого поля течений, которые продуцируются всплывающими плюмами сбрасываемых загрязненных вод. Узкие смерчеподобные вихри в таких плюмах ("вихревые столбы") были обнаружены ранее при подробных изучениях мелкомасштабных течений вблизи коллекторов глубинных стоков на шельфе вблизи г. Гонолулу (Бондур и др., 2009) и вблизи г. Геленджик (Бондур и др., 2011а, 2011б). В настоящей статье мы видим проявления вихрей несколько бóльшего масштаба, но также связанных с глубинными стоками. Таким образом, проявляется динамическое взаимодействие сбрасываемых вод и фоновых течений, которые переносят эти воды в горизонтальном направлении, испытывая при этом искажения под воздействием всплывающих вод. Все это приводит к довольно сложной картине распространения загрязнений, связанных со сбросами в море.

ПРОЯВЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ГЛУБОКОВОДНЫМ СТОКОМ, НА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ

Негативное воздействие глубинных стоков на экологическую ситуацию в прибрежных акваториях подтверждается данными, полученными путем аэрокосмических съемок Геленджикского шельфа. На поверхности моря в районе расположения сбросового устройства обычно наблюдаются слики, связанные с выходом к поверхности сбрасываемых вод. Существование таких сликов хорошо проявляется на спутниковых радарных изображениях морской поверхности (Бондур, 2004; Бондур, Гребенюк, 2001; Bondur, 2011). Загрязнение акватории хорошо проявляется на аэрокосмических снимках и в видимом диапазоне (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005; Bondur, 2011). На вертолетном снимке прибрежной части шельфа, приведенном в работе (Лаврова и др., 2011), хорошо заметен дугообразный шлейф грязных вод, вытекающих из отверстия в трубопроводе всего в 168 м (!) от берега (см. рис. 7 на цветн. вклейках). Более того, на этом шлейфе можно различить и неоднородности меньшего масштаба, подобные проявлениям вихревых образований, обнаруженных по данным измерений донным ADCP (Бондур и др., 2011а, 2011б).

Загрязнения от сбрасываемых вод вблизи г. Геленджик, регистрируемые космической аппаратурой, проявляются также в виде мелкомасштабных оптических неоднородностей водной среды (Бондур, 2004; Bondur, 2011). Подобные неоднородности были выявлены путем обработки многоспектральных изображений высокого пространственного разрешения, полученных со спутника IKONOS на основе использования характеристик относительной изменчивости сигналов обратного рассеяния в различных участках спектра электромагнитных волн (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005; Bondur, 2011). Такой подход не связан с измерением абсолютных величин параметров морской среды и ориентирован, в большей степени, на выявление различных динамических процессов в океане.

В качестве характеристики относительной изменчивости сигналов обратного рассеяния может быть использован индекс цвета (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005; Ерлов, 1980)

$$I_{\text{ц}} = B(450)/B(520), \qquad (1)$$

где $B(450)$ и $B(520)$ – яркости восходящего из морской среды излучения на длинах волн 450 и 520 нм при наблюдении в надир.

Индекс цвета получил распространение как самостоятельная характеристика, используемая для представления результатов исследований океана и их интерпретации на качественном уровне (Бондур, Зубков, 2005; Оптика океана, 1983). Этот индекс чувствителен к множеству факторов, определяющих состояние морской среды. Так, яркость в коротковолновом участке спектра видимого излучения (синяя область) зависит от концентрации хлорофилла, состава и концентрации растворенных органических веществ, в то время как яркость в зеленой области спектра в большей степени определяется составом, концентрацией и распределением частиц взвеси по размерам (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005).

Можно предложить и другие варианты индекса цвета с использованием иных участков спектра. Очевидно, что смысловая нагрузка индекса в каждом конкретном случае будет зависеть от сочетания длин волн. Так, например, если взять

$$I'_{\text{ц}} = B(520)/B(690), \qquad (2)$$

то в этом случае яркость в красном участке спектра определяется в основном составом и концентрацией взвеси в тонком подповерхностном слое морской среды (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005). При обработке и анализе изображений поверхности океана, полученных со спутника IKONOS, индексы цвета можно представить в виде (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005)

$$\begin{gathered} B(450–520)/G(520–600); \\ B(450–520)/R(600–690); \\ G(520–600)/R(600–690). \end{gathered} \qquad (3)$$

Двумерные распределения данных величин (в плоскости поверхности океана) использова-

лись для создания цветокодированных изображений и синтезированных цветовых образов в трехмерном пространстве индексов цвета. Для выявления оптических аномалий морской среды по космическим многоспектральным данным и полям индексов цвета целесообразно применять также специальные методы обработки космических изображений, например, декорреляционное растяжение, преобразования цветовых пространств, цветовое кодирование и т.д. (Гонсалес, Вудс, 2005).

На рис. 8 (на цветн. вклейках) представлен, синтезированный в натуральных цветах (цветовое пространство RGB) фрагмент изображения (рис. 8*а*), полученного со спутника IKONOS 8 августа 2008 г. для района проведения исследований вблизи г. Геленджик, а также результат декорреляционного растяжения этого фрагмента (рис. 8*б*) и его увеличенные участки (рис. 8*в*, *г*). На расположенных в нижней части рисунка увеличенных фрагментах можно выделить две особенности.

На рис. 8*б* прослеживается цветовая аномалия зелено-желтых оттенков на желто-красном и сине-зеленом фоне, вызванная проявлением глубинного сброса загрязненных вод. Аномалия имеет дугообразную форму и ориентирована в направлении восток–запад. Ширина выделенной аномалии ~120 м, а протяженность ~1400 м. Подобная форма аномалии связана с характером морских течений в прибрежной зоне Черного моря, существовавшими в день съемки со спутника, которые были направлены вдоль береговой линии.

На рис. 8*г* отчетливо виден поверхностный сток, впадающий в прибрежную акваторию (обозначен голубым цветом) юго-восточнее сбросового устройства. Менее плотная относительно окружающих соленых вод пресная струя, распространяясь в морской толще, меандрирует с пространственным периодом порядка 220 м и четко прослеживается на расстояние 850 м от берега.

На рис. 9 (на цветн. вклейках) приведены цветокодированные изображения распределений отношений канальных сигналов $\xi = B/G$ для фрагмента исходного изображения, прошедшего процедуру декорреляционного растяжения.

Как видно из рис. 9*а*, в исследуемой акватории имеются как зоны экстремально низких значений $\xi = B/G$ (обозначены черным и фиолетовым цветами), так и зоны экстремально высоких значений отношения $\xi = B/G$ (обозначены белым и темно-красным цветами). Данные зоны приурочены к мелководным прибрежным участкам (низкие значения B/G), где значительный вклад в формирование оптических космических изображений вносят отражения от морского дна и ветровые тени (высокие значения B/G). Участки акватории, имеющие естественные перепады значений отношения B/G, окрашены оттенками красного, желтого и зеленого цветов.

Как видно из рис. 9, распределения отношений канальных сигналов носят неоднородный характер. Зоны повешенной и пониженных значений распределены перемежающимися пятнами по всей площади изображения. Области пониженных значений отношения канальных сигналов $\xi = B/G$ могут быть связаны с концентрацией в них растворенных органических веществ, частиц взвеси, гумусоподобных соединений, поступающих с суши, а также с изменениями в самой морской среде, вызванными этими веществами.

На рис. 9*а* выявляются три основные зоны загрязнений – это речной сток в правом нижнем углу изображения, обширная аномалия, вызванная воздействием глубинного стока коммунальных вод г. Геленджик, а также зона выхода из Геленджикской бухты.

Так как на побережье Черного моря в исследуемом районе присутствуют как антропогенные, так и естественные источники загрязнений различных типов, то для достоверной количественной оценки областей воздействия речного и глубинного стока загрязненных вод требуется проведение дополнительных подспутниковых измерений, математического моделирования и использования космических данных большего спектрального разрешения. Общая картина загрязнений прибрежной акватории является суперпозицией полей антропогенных и естественных воздействий от большого числа источников различных типов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных на Геленджикском шельфе Черного моря с помощью буксируемого акустического профилометра, получены данные о сильных пространственной и временной изменчивостях приповерхностных течений в осенний период года. Установлено влияние глубинного стока на динамику прибрежных вод и исследованы характеристики поверхностного загрязнения морской воды под воздействием этого источника антропогенных воздействий. Выявлено наличие связи между неоднородностями в поле приповерхностных загрязнений и особенностями полевых течений.

По результатам проведенных исследований, обнаружено сильное загрязнение воды в Голубой и Геленджикской бухтах и повсеместное загрязнение поверхностного слоя (0–10 м) на шельфе.

По результатам анализа многоспектральных космических изображений высокого разрешения, полученных со спутника IKONOS, для акватории вблизи г. Геленджик, выявлены мелкомасштабные оптические неоднородности морской среды, вызванные естественными и интенсивны-

ми антропогенными воздействиями. Обнаружено также поверхностное проявление воздействия заглубленного стока на водную среду и определен ареал распространения факела загрязнений.

Работа выполнена при государственной поддержке ведущей научной школы НШ-374.2012.5 “Аэрокосмические исследования и мониторинг взаимодействия атмосферы и океана в интересах наук о Земле, экологии и рационального природопользования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии / Новые идеи в океанологии. Т. 1: Физика. Химия. Биология. М.: Наука, 2004. С. 55–117.

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.

Бондур В.Г., Зубков Е.В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Ч. 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Специфические неоднородности мелкомасштабных течений на шельфе в области влияния придонной конвекции // Докл. РАН. 2009. Т. 429. № 1. С. 110–114.

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Мелкомасштабные вихревые столбы на морских шельфах, генерируемые придонной конвекцией // Мат. 4-й Межд. конф. “Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках”. 18–20 октября 2011 г. Москва, 2011а.

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Муякшин С.И., Сабинин К.Д. Тонкие вихревые столбы на шельфе в области влияния придонной конвекции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011б. Т. 47. № 2. С. 254–262.

Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 242 с.

Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Под ред. Зацепина А.Г., Флинта М.В. М.: Наука, 2002. 476 с.

Коняев К.В., Сабинин К.Д. Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // ДАН СССР. 1973. Т. 209. № 1. С. 86–89.

Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 471 с.

Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. Монина А.С. М.: Наука, 1983. 372 с.

Техногенное загрязнение и процессы естественного самоочищения прикавказской зоны Черного моря. М.: Недра, 1996. 502 с.

Титов В.Б. Характеристики Основного Черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей в Российском секторе Черного моря // Океанология. 2002. Т. 42. № 5. С. 668–676.

Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // Waste Water – Evaluation and Management. InTech. Croatia. 2011 P. 155–180.

Study of Fields of Currents and Pollution of Coastal Waters on Gelendzhik Shelf of the Black Sea with Space Monitoring Methods

V. G. Bondur[1], V. E. Vorobjev[1], Yu. V. Grebenjuk[1], K. D. Sabinin[1], A. N. Serebryny[2]

[1] Scientific Research Institute for Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, Ministry of Education and Sciences of the Russian Federation, Russian Academy of Sciences, Moscow

[2] N.N. Andreyev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

The paper presents the main data processing results of hydrophysical and imagery space monitoring research of the fields of currents and pollution of Gelendzhik shelf coastal waters in the Black Sea. According to towed acoustic profiler measurements, a strong spatial and time variability of surface fields of currents is discovered. It is revealed that submerged outfall has an effect on dynamics and characteristics of pollution of coastal waters. Space imagery analysis results revealed optical small-scale inhomogeneities and surface effect of submerged outfall impact on coastal water area of Gelendzik Bay; the jet pollution area is determined as well.

Keywords: space monitoring, fields of currents, vortex near-bottom convection, sound-dispersing layers, acoustic-Doppler -profiler, submerged outfall, pollution of coastal waters, Black Sea

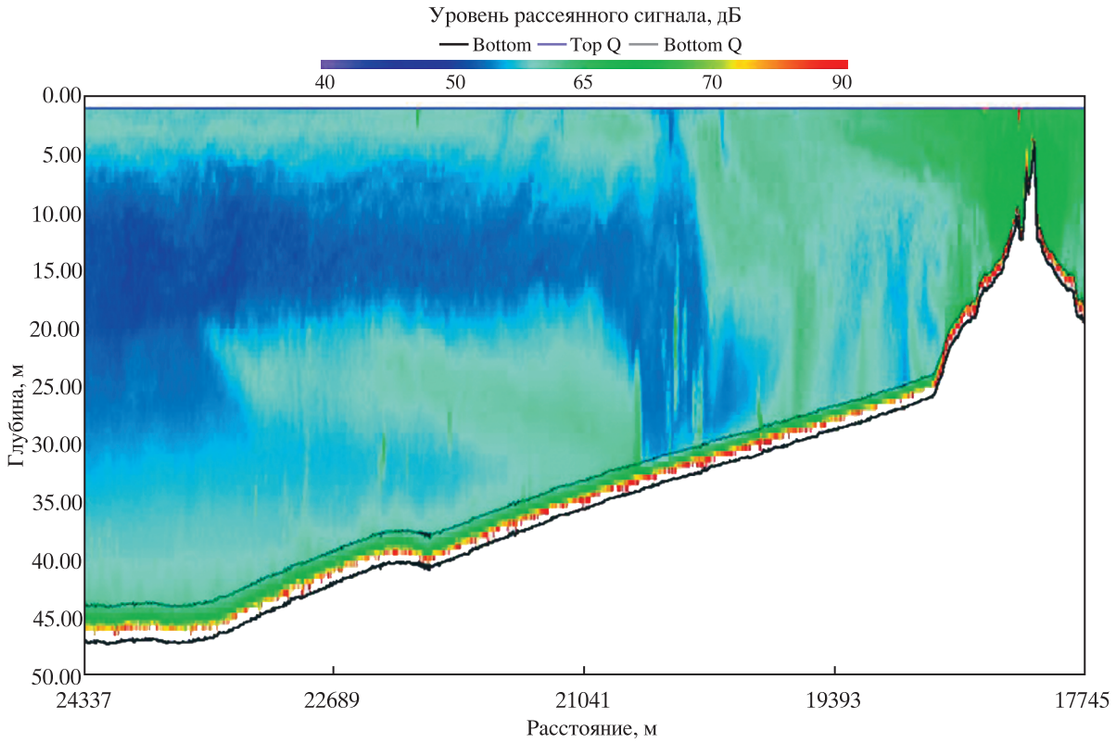


Рис. 4. Интенсивности рассеянного акустического сигнала по данным измерений 1 октября 2009 г. вблизи сбросового устройства: вверху – цветовая шкала интенсивности рассеянного сигнала в децибелах; внизу – отражения от рельефа дна.

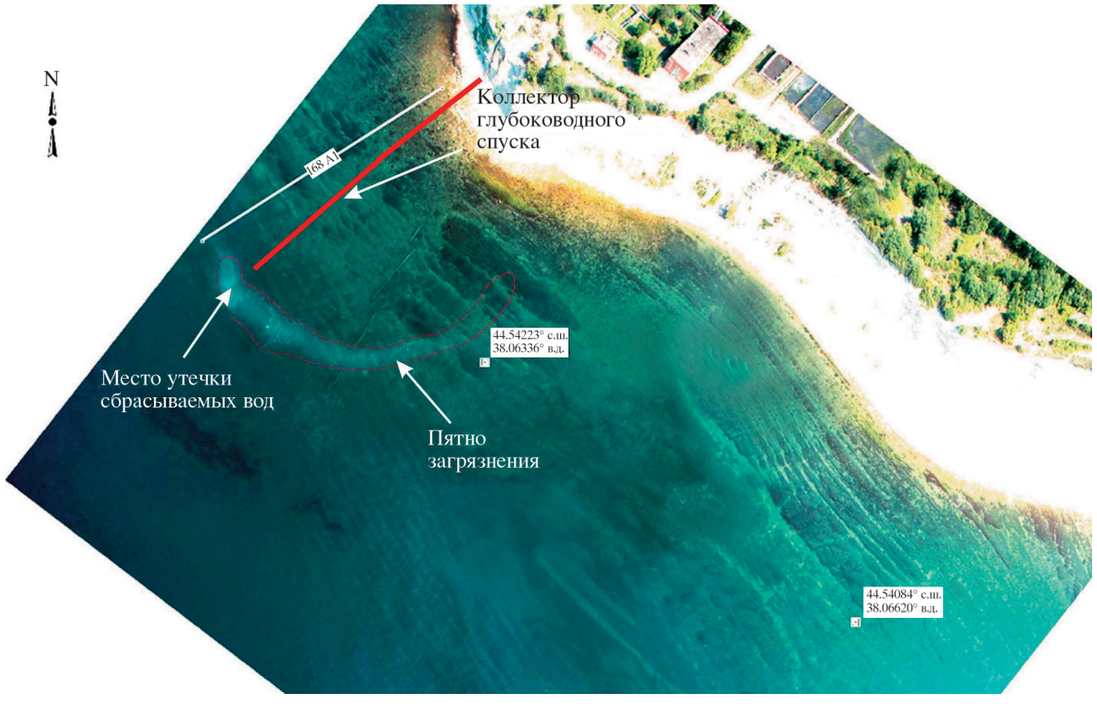
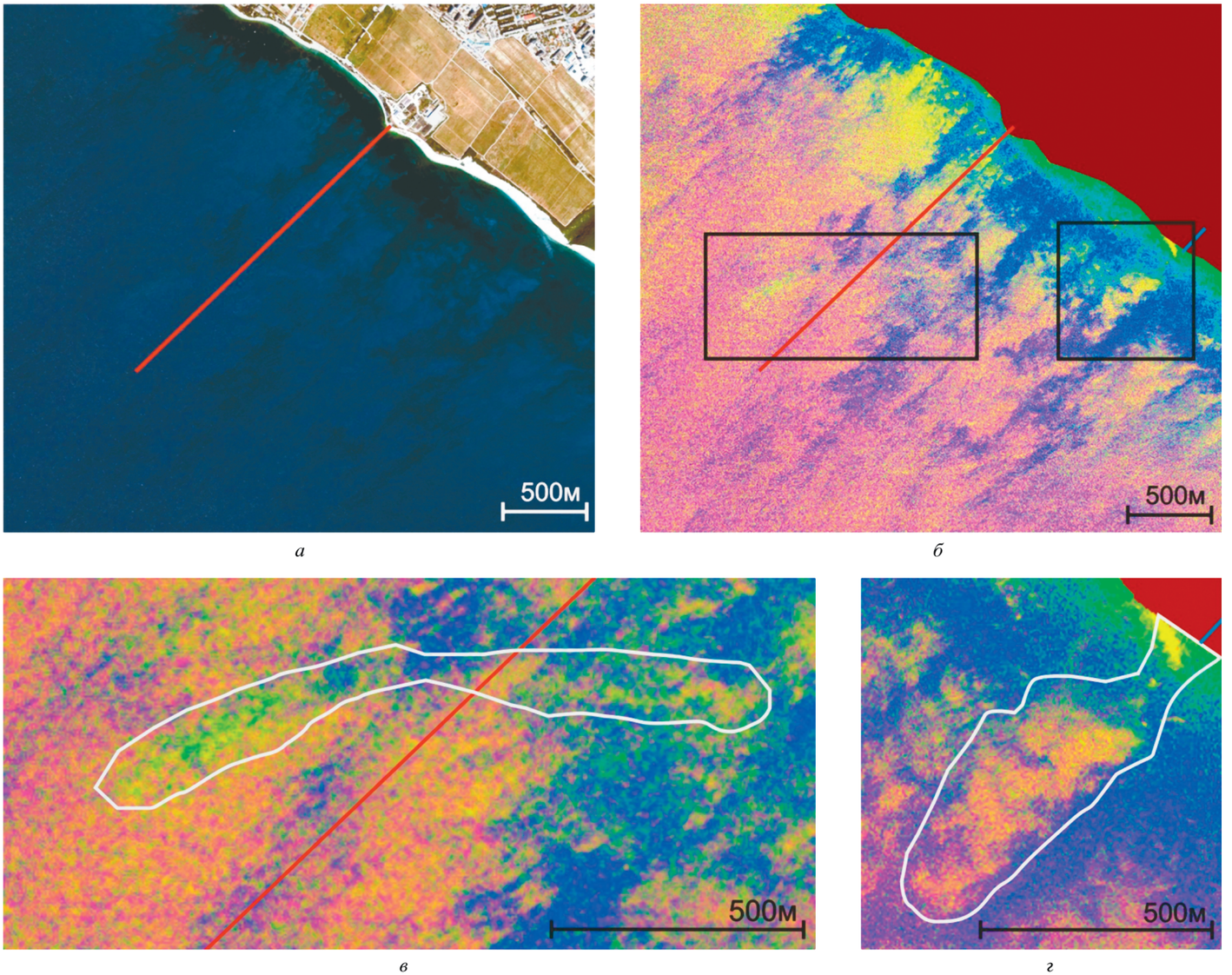


Рис. 7. Проявление глубинного стока в прибрежные воды у г. Геленджик на снимке, полученном с вертолета (Лаврова и др., 2011). Стрелками указаны: коллектор глубоководного спуска; место утечки сбрасываемых вод; пятно загрязнения, вызванное этими водами.

Issled.zemli N4-ver_Bondur.indd 1 7/17/12 8:26:06 AM

Issled.zemli N4-ver_Bondur.indd 2

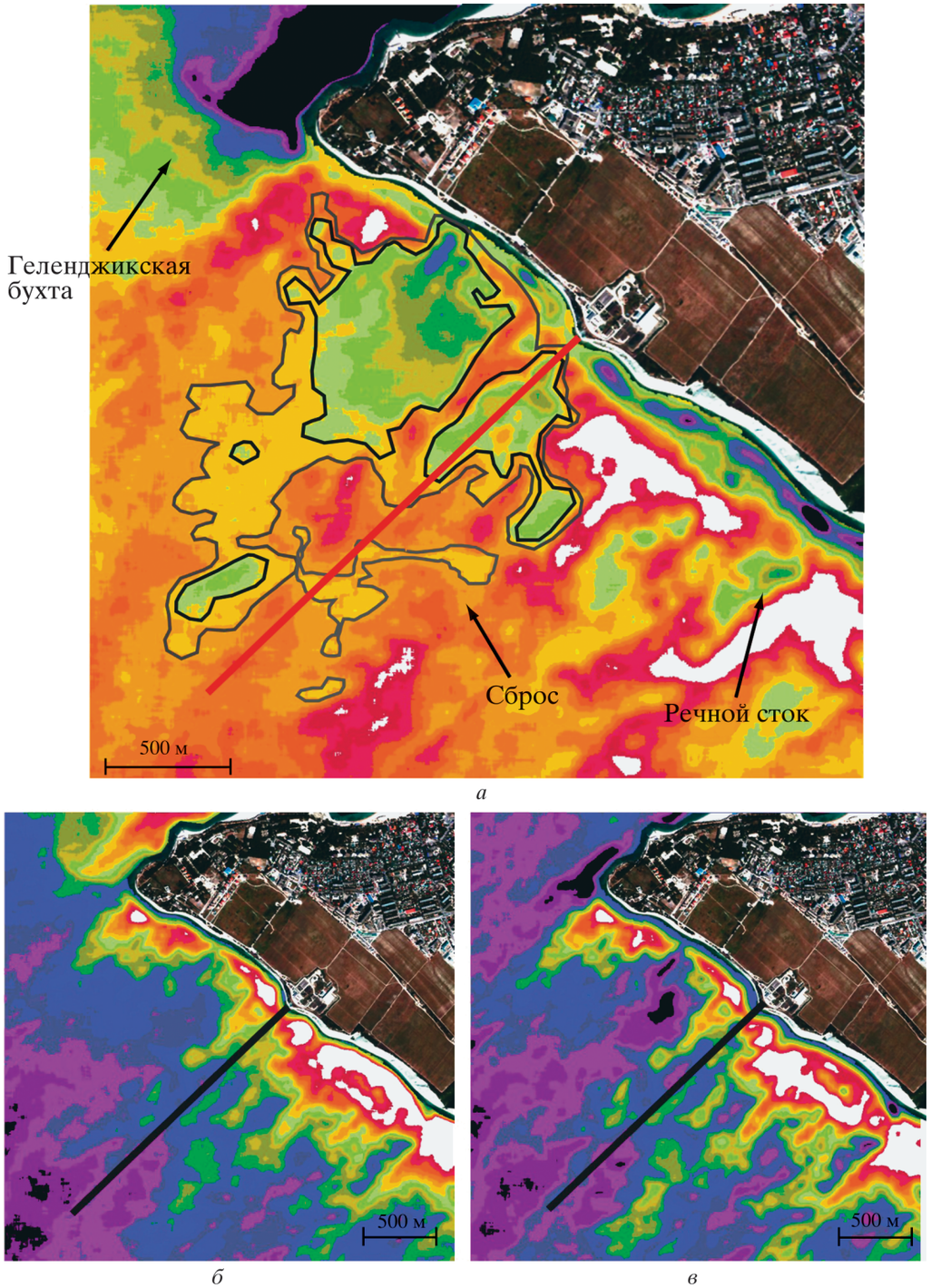


а *б*

в *г*

Рис. 8. Фрагмент исходного космического изображения, полученного со спутника IKONOS, для района расположения сбросового коллектора: *а* и *б* – результат декореляционного растяжения данного фрагмента изображения; *в* и *г* – увеличенные фрагменты изображения *б*.

7/17/12 8:26:07 AM



а *б* *в*

Рис. 9. Цветокодированное изображение распределений отношений канальных сигналов $\xi = B/G$ для фрагмента исходного изображения, прошедшего процедуру декорреляционного растяжения.

Issled.zemli N4-ver_Bondur.indd 3 7/17/12 8:26:08 AM

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 12–25

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА АРКТИКИ В ПЕРИОД ЛЕТНЕГО МИНИМУМА 2011 г.

© 2012 г. Н. Г. Платонов*, И. Н. Мордвинцев, В. В. Рожнов, И. В. Алпацкий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук, Москва

**E-mail: platonov@sevin.ru*

Поступила в редакцию 23.01.2012 г.

В работе оценен летний минимум площади и протяженности морского льда Арктики в 2011 г. по данным пассивного микроволнового зондирования. По сравнению с ледовой обстановкой за период спутниковых наблюдений (1979 г.–настоящее время) выявлено, что размер ледовой шапки близок к абсолютному рекордно низкому значению, зафиксированному в 2007 г., но пространственное распределение льда в конце лета 2007 и 2011 гг. различно из-за влияния атмосферной циркуляции на положение ледовой кромки. Показано, что, начиная с 2003 г., скорость убывания ледового покрова возросла в 4 раза. С помощью методов уменьшения размерности и анализа канонических корреляций построена линейная модель, позволяющая осуществлять краткосрочные прогнозы ледовой обстановки в Арктике в глобальном масштабе и реконструировать значения летней концентрации льда в доспутниковую эру до середины XX в. по полям температуры воздуха. Результаты моделирования подтверждают резкое изменение площади морского льда на конец лета после 2002 г.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, многоканальные радиометры, концентрация, площадь и протяженность морского льда Арктики, метод главных компонент, анализ канонических корреляций

ВВЕДЕНИЕ

Анализ ледовитости в период минимальной протяженности ледового покрова является актуальной задачей. В сентябре 2007 г. произошло крупнейшее, по сравнению с непрерывными наблюдениями с конца 1970-х годов, уменьшение арктической ледовой шапки. Этот факт зафиксирован и обсужден большинством ученых в области гляциологии, климатологии и арктических экосистем. И с тех пор каждое достижение летнего минимума сравнивается с 2007 г., который, возможно, является узловой точкой изменения арктического климата.

Ледовый покров в период минимальной протяженности остается местообитанием арктических млекопитающих. Некоторые виды ластоногих (морж, морской заяц) питаются донными организмами, поэтому предпочитают мелководные участки, глубина которых не превышает 100 м. Если кромка льда уходит далеко на север, за пределы шельфовой зоны, то эти виды млекопитающих вынуждены либо уйти за льдом за пределы кормовой базы, либо проводить некоторое время на безледных местах. В любом случае, уменьшение ледового покрова является стрессовой ситуацией для животного.

Морской лед и снег на его поверхности являются хорошими отражателями коротковолновой солнечной радиации. Уменьшение протяженности ледового покрова увеличивает поглощение солнечной энергии океаном, нагревая поверхностный слой. Помимо отражательных, лед обладает изоляционными свойствами, препятствуя вертикальному энергообмену между океаном и атмосферой.

Переживший лето однолетний лед переходит в категорию многолетнего. Увеличение площади и толщины многолетнего льда является количественным признаком “здоровья” арктической системы. Такой лед, как более крепкий, менее подвержен воздействию факторов, вызывающих таяние.

Таким образом, площадь морского льда в период его минимальной протяженности является индикатором изменения арктического климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных для оценки площади и протяженности ледового покрова Арктики использована концентрация льда по спутниковым микроволновым данным с применением алгоритма Bootstrap (Comiso, 2008).

Выбор спутниковых микроволновых данных пассивного диапазона обеспечивает практически всепогодные измерения вне зависимости от освещенности поверхности. Измерения с помощью микроволновых радиометров SMMR, SSM/I и AMSR-E, установленных на серии метеорологи-

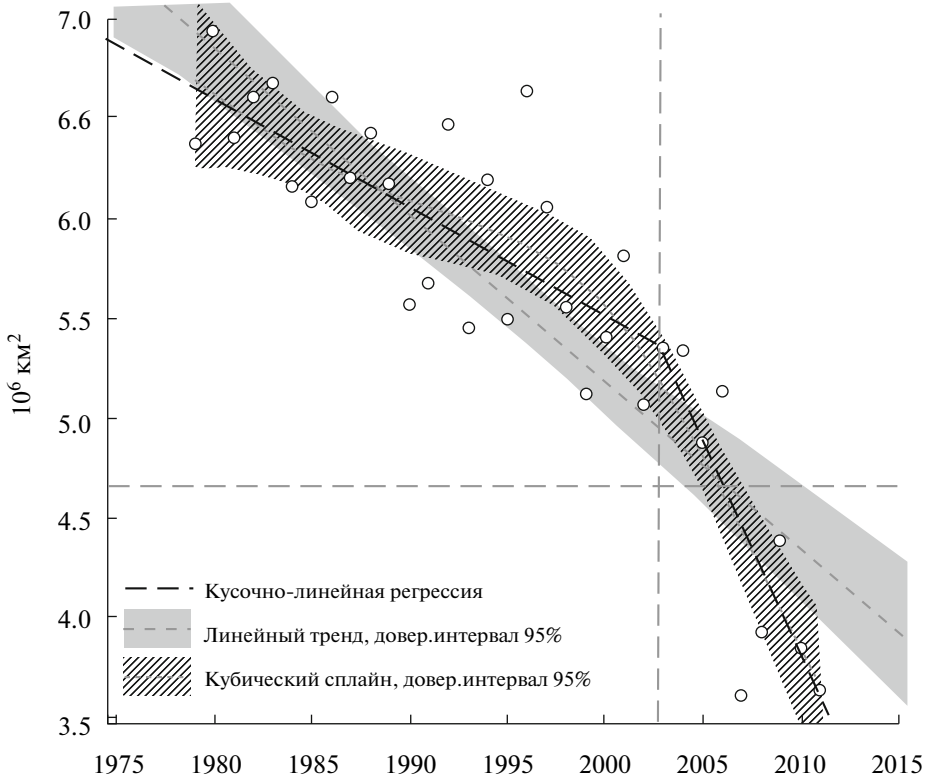


Рис. 1. Летний минимум площади морского льда Арктики.

ческих спутников Nimbus-7 (SMMR, октябрь 1979 г.–август 1987 г.), DMSP F8 (SSM/I, июль 1987 г.–декабрь 1991 г.), DMSP F11 (SSM/I, декабрь 1991 г.–август 1995 г.), DMSP F13 (SSM/I, май 1995 г.–апрель 2009 г.), Aqua (AMSR-E, июнь 2006 г.–04 октября 2011 г.), обеспечивают ежесуточное (Nimbus-7 – каждые два дня) покрытие арктического региона в умеренном для масштабов Арктики пространственном разрешении (AMSR-E – 12.5 км, остальные – 25 км).

Выбор алгоритма Bootstrap (Comiso, 2008) осуществлен по результатам сравнительного анализа концентрации морского льда по данным различных систем спутникового зондирования (Belchansky, Douglas, 2002). Этот алгоритм оценивает суммарную концентрацию морского льда по адаптивной стратегии, основанной на гибком использовании разности радиояркостных температур двух спектральных каналов (19V-37V либо 37H-37V) в зависимости от сезона и пространственного распределения льда.

При оценке суточной площади и протяженности льда учитывались искажения длин и площадей, свойственные полярной стереографической проекции, применялись пространственная и временная фильтрации для заполнения пропусков данных (интерполяция). В работе рассмотрены две пространственные альтернативы – маски рассматриваемого региона. “Полярный пробел” – область вблизи полюса, недоступная для наблюдений, – либо заполнялся значением концентрации 100%, либо происходило отсечение региона севернее 84.5° с.ш. Вторая опция заключалась в рассмотрении прибрежной зоны, либо в ее отсечении (50 км), либо в ее рассмотрении как области, в которой весь присутствующий лед на поверхности океана является морским. Количественные характеристики включали в себя значения протяженности льда (площадь поверхности, покрытой льдом с концентрацией ≥15%) и площади льда (протяженность льда, умноженная на значение концентрации).

ПЛОЩАДЬ И ПРОТЯЖЕННОСТЬ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА С УЧЕТОМ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ

По состоянию на 19 сентября 2011 г., минимальная протяженность ледового покрова достигнута 10 сентября и составила 4.66×10^6 км^2 (без учета оффшорной зоны 50 км, с заполнением полярного пробела концентрацией 100%). Результаты многолетней динамики площади морского льда по этим условиям представлены на рис. 1. В 2007 г. минимальная протяженность 15 сентября составила 4.19×10^6 км^2. Для сравнения: в 1980 г. минимальная протяженность льда зафиксирована 26 августа на отметке 7.88×10^6 км^2. Это самая ранняя дата достижения летнего минимума, са-

мая поздняя регистрация произошла в 1995 г., 29 сентября. По результатам регрессионного анализа происходит статистически значимое ($S > 99.9\%$) уменьшение минимальной протяженности льда со скоростью $(80.9 \pm 9.1) \times 10^3$ км^2 / год. С 1979 г. по 2011 г. протяженность льда уменьшилась на 33% – с 7.76×10^6 км^2 до 5.17×10^6 км^2. Относительно дат достижения летнего минимума происходит запаздывание со скоростью (0.19 ± 0.11) д/год, $S = 90\%$, за 33 года достижение летнего минимума сместилось от 09 сентября к 15 сентября.

Минимальная площадь льда, с учетом прибрежной зоны и при допущении, что в районе полюса концентрация льда 100%, по состоянию на 19 сентября 2011 г. зафиксирована 07 сентября и составила 3.64×10^6 км^2 (рис. 1, круглые маркеры). Эта оценка очень близка к рекордно низкому значению 2007 г., когда площадь льда 14 сентября составила 3.61×10^6 км^2. Максимальное значение летнего минимума, 6.93×10^6 км^2, зафиксировано 30 августа 1980 г. Уменьшение минимальной площади льда происходит со скоростью $(82.6 \pm 8.5) \times 10^3$ км^2/год, $S > 99.9\%$ (рис. 1, пунктир средних размеров, сплошная заливка – 95% доверительного интервала). По результатам регрессионного анализа, за 33 года площадь уменьшилась на 38%, с 6.93×10^6 км^2 до 4.29×10^6 км^2. Самое раннее достижение наблюдалось в 1987 г., 23 августа, самое позднее – в 2005 г., 21 сентября. Достижение летнего минимума по площади с каждом годом фиксируется все позже, но скорость, (-0.15 ± 0.10) д/год, является статистически незначимой ($S = 85\%$). По результатам линейного регрессионного анализа в 1979 г., достижение летнего минимума фиксировалось 05 сентября, а в 2011 г. – 10 сентября.

В среднем, достижение летнего минимума по площади происходит на 5 дней раньше, чем по протяженности, 08 и 12 сентября, соответственно. Это вызвано тем, что на поверхности льда температура воздуха опускается меньше нуля, замерзают талые озера, трещины и разводья покрываются молодым льдом. В это же время в периферийной зоне продолжается таяние, и это уменьшает протяженность.

Влияние прибрежной зоны проявляется в искажении сигнала на границе двух сред, земли и океана, а также в присутствии припайного льда, характеристики которого отличаются от дрейфующего. Узкие проливы, каналы, небольшие бухты с большой вероятностью заполнены припайным льдом. В связи со сложностями идентификации припайного льда по данным пассивного микроволнового зондирования, применяют отсечение прибрежной зоны в 1–2 пиксела по данным SSM/I, или в 50 км. Минимальная протяженность без учета прибрежной зоны в 2011 г. составила 3.95×10^6 км^2, диапазон значений от 6.83×10^6 км^2 в 1980 г. до 3.71×10^6 км^2 в 2007 г. Аналогичные значения минимальной площади льда составили 6.23, 3.25 и 3.30×10^6 км^2 в 1980, 2007 и 2011 гг. соответственно.

ПЛОЩАДЬ И ПРОТЯЖЕННОСТЬ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА ЮЖНЕЕ 84.5° С.Ш.

Характеристики SMMR не позволяют сканировать поверхность Земли севернее 84.6° с.ш., тогда как AMSR-E, как более совершенный прибор, охватывает территорию почти до 89° с.ш. Параллельно с эволюцией сенсоров наблюдается уменьшение площади и протяженности льда. Чем больше размер полярного пробела, тем сильнее завышение концентрации вблизи полюса. Чтобы избежать искусственного завышения концентрации в регионе, недоступном для наблюдений, мы отсекли территорию севернее 84.5° с.ш., чуть южнее, чем минимальная граница сканирования серии сенсоров.

В среднем, минимальная протяженность льда южнее 84.5° с.ш. фиксируется 12 сентября и составляет 5.28×10^6 км^2. В 2011 г. летний минимум составил 3.48×10^6 км^2 (10 сентября). Минимальное значение наблюдалось в 2007 г. (3.00×10^6 км^2, 15 сентября), максимальное – в 1980 г. (6.70×10^6 км^2, 26 августа). В 1980 г. – самая ранняя дата за 33 года наблюдения, самая поздняя – 29 сентября, в 1995 г., однако статистически значимого изменения не наблюдается, с 09 сентября в 1979 г. к 15 сентября в 2011 г., $S = 90.3\%$. По результатам регрессионного анализа, протяженность льда убывает со скоростью $(80.9 \pm 9.1) \times 10^3$ км^2/год, $S > 99.9\%$, с 6.57×10^6 км^2 в 1979 г. до 3.98×10^6 км^2 в 2011 г.

Минимальная площадь льда южнее 84.5° с.ш. в 2011 г. была 2.47×10^6 км^2 (07 сентября). Это на 0.02×10^6 км^2 меньше предыдущего “рекорда” в 2007 г., зафиксированного 14 сентября. Максимальное значение минимума площади (5.75×10^6 км^2) наблюдалось 30 августа 1980 г. Убывание площади происходит со скоростью $(81.7 \pm 8.4) \times 10^3$ км^2/год, $S > 99.9\%$, а сроки достижения становятся позднее, $(+0.18 \pm 0.10)$ д/год, $S = 91\%$.

Тенденции сохраняются и при отсечении 50-км прибрежной зоны. Минимальная протяженность варьируется от 2.53×10^6 км^2 в 2007 г. (16 сентября) до 5.64×10^6 км^2 в 1980 г. (26 августа). В 2011 г. минимальная протяженность морского льда зафиксирована 10 сентября и составила 2.77×10^6 км^2. По результатам линейного регрессионного анализа за 33 года протяженность льда уменьшилась на 42%, с 5.61×10^6 км^2 в 1979 г. до 3.28×10^6 км^2 в 2011 г. Достижение летнего минимума становится с каждым годом позднее, если в начале периода наблюдения, в 1979 г., минимальная протяженность наблюдалась 08 сентября, то в настоящее

время, в 2011 г., достижение происходит 15 сентября (значимость 93.4%).

Без учета 50-км береговой зоны, наименьшая площадь льда в период летнего минимума наблюдалась 14 сентября 2007 г. и 07 сентября 2011 г. и составила 2.14×10^6 км^2, а наибольшая – 5.05×10^6 км^2 – 24 августа 1980 г. Уменьшение минимальной площади происходит со скоростью $(72.4 \pm 7.5) \times \times 10^3$ км^2/год, и за 33 года минимальная площадь льда уменьшилась на 46%, с 5.03×10^6 км^2 до $2.72 \times \times 10^6$ км^2. Статистическая значимость запаздывания наступления летнего минимума льда по площади с 05 сентября в 1979 г. к 11 сентября в 2011 г. составляет 77%. Самое раннее достижение летнего минимума наблюдалось в 1987 г., 23 августа, а самое позднее – в 1995 г., 29 сентября.

Таким образом, уменьшение минимальных площади и протяженности ледового покрова не связано с развитием технологии и улучшением характеристик измерительных приборов.

НЕЛИНЕЙНОСТЬ В ИЗМЕНЕНИИ ПЛОЩАДИ И ПРОТЯЖЕННОСТИ ЛЬДА В ПЕРИОД ЛЕТНЕГО МИНИМУМА

Выше рассмотрен анализ линейных трендов в изменении площади и протяженности морского льда в летний период максимального таяния льда, приходящийся, в среднем, на начало и середину сентября. Однако, начиная с 1999–2000 гг., убывание происходит более быстрыми темпами. На качественном уровне это становится заметно в случае применения LOESS-сглаживания (Cleveland, Devlin, 1988), а также при применении аппроксимации натуральными кубическими сплайнами (Hastie, 1992) (рис. 1, косая штриховка). Оба метода по 33 измерениям (для метода LOESS использовался размер окружения 3/4) оказались очень похожими. Таким образом, при сохранении этой тенденции Арктика может лишиться многолетнего льда уже через 15–20 лет.

Для определения возможной переходной точки в изменении площади и протяженности морского льда в период окончания таяния и начала замерзания (“летний минимум”) использован метод кусочно-линейной регрессии (рис. 1, длинный пунктир). В основе этого метода лежит построение непрерывной кусочно-линейной функции (одна узловая точка, разделяющая два соприкасающихся подмножества данных) с использованием метода наименьших квадратов. Схожий подход использован в работе авторов (Бельчанский и др., 2004), применивших непрерывные кусочно-линейные функции для корректировки калибровочных значений микроволнового радиометра. Выбор разделяющей два подмножества точки осуществлен направленным перебором с сужающимися границами и уменьшающимся шагом до достижения требуемой точности. Регрессионные коэффициенты находились решением системы линейных алгебраических уравнений.

Согласно кусочно-линейному регрессионному анализу, узловая точка приходится на начало XXI в. В частности, уменьшение площади “летнего минимума” при условии заполнения полярного пробела наблюдений 100%-ной концентрацией, начиная с 2003 г., осуществляется с большей скоростью, чем до 2002 г. включительно. Коэффициент наклона отрезка 1979–2002 гг. составляет -53.7×10^3 км^2/год. С 2003 г. скорость убывания возрастает почти в 4 раза, до 224.5×10^3 км^2/год. При сохранении такой тенденции, эра полного исчезновения льда в летний период наступит раньше, чем предсказывается современными моделями.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЛЕТОМ 2011 г.

Анализ среднемесячных значений температуры воздуха, атмосферного давления и скорости ветра в весенне-летний период 2011 г. проведен для выявления возможных предпосылок, повлиявших на значение концентрации морского льда в сентябре 2011 г. При анализе аномалий использован десятилетний базовый период 2000–2009 гг. Под аномалией 2011 г. подразумевается разность между значением параметра в 2011 г. и осредненным значением за период 2000–2009 гг.

В целом атмосферная циркуляция за период с марта по август 2011 г. не отличается экстремальностью. Это вытекает из среднемесячных значений индекса арктических осцилляций, по абсолютной величине, не превышающей 2, за исключением апрельского значения (+2.27). Высокое положительное значение индекса отражает преобладание циклонической деятельности в Северном полушарии.

В марте 2011 г. в северных частях Баренцева и Карского морей преобладало низкое давление. Это могло способствовать поверхностному продвижению в южной части Баренцева моря теплых атлантических вод на восток и их проникновению в Карское море и распространению на север Баренцева моря. Преобладание южных ветров в районе п-ова Таймыр могло быть причиной значительной, выше 7°C, температурной аномалии в Карском море. В целом над всей центральной Арктикой температура воздуха была выше, чем в аналогичный период 2000–2009 гг. Помимо Карского моря, высокая положительная аномалия температуры воздуха наблюдалась и в северной части Чукотского моря, и вблизи Канадского архипелага. Наибольшая отрицательная аномалия морского льда в марте наблюдается вблизи Новой Земли. В Беринговом море проявляется перерас-

пределение льда: повышенная концентрация в западной части моря и пониженная – в восточной. В северной части Баренцева моря концентрация льда не меньше, чем в среднем за период 2000–2009 гг.

В апреле 2011 г. сформировалась область высокого давления над Чукоткой и в западной части моря Бофорта. Преобладающее над Гренландским морем низкое давление могло способствовать проникновению поверхностных теплых вод Атлантики в Арктику через южную часть Баренцева моря. Над океанической частью Арктики преобладает позитивная аномалия температуры поверхностного воздуха, однако над материковыми частями прослеживается разделение на отрицательную аномалию в западном секторе и положительную – в восточном. В районе Обской Губы и Берега Харитона Лаптевых появляются полыньи. В восточной части Баренцева моря льда меньше, чем в среднем за аналогичный период 2000–2009 гг., но зато наблюдается повышенная ледовитость в северной части Баренцева моря.

В мае 2011 г. антициклоны преобладали над Гренландией, к северу от о. Виктория, к северо-западу от Гудзонова залива. К югу от Исландии, между Новой Землей и Землей Франца-Иосифа, наблюдались низкое давление и циклоническая деятельность ветров. Если исландский циклон мог препятствовать проникновению в Арктику теплого атлантического воздуха, то циклон в восточной части Баренцева моря мог способствовать сохранению льда в Баренцевом море. Особых температурных аномалий в этом месяце в центральной части Арктики не наблюдалось. Раннее таяние льда произошло в Обской Губе, начинается таяние льда в Чукотском море и образование Великой Сибирской полыньи. Наблюдается оффшорное движение льда в море Бофорта и Гудзоновом заливе. Граница льда в проливе Дэвиса немного южнее, чем обычно.

В июне 2011 г. над Канадским бассейном устанавливается высокое давление, это способствует образованию Бофортова вихря. Над хребтом Черского находится зона пониженного давления, и это препятствует закручиванию вихря. В морях Бофорта, Чукотском, Восточно-Сибирском и Лаптевых преобладают ветра восточных румбов. Возможно, вскрытие Чукотского моря произошло благодаря зональной адвекции льда; по той же причине могло произойти образование Заврангельской полыньи. На Западно-Сибирской равнине установилась положительная аномалия температуры. Прогрев сибирских рек мог повлиять на таяние льда в прибрежной зоне Карского моря. В целом над морской акваторией Арктического бассейна температура воздуха выше, чем среднеиюньская температура базового периода (2000–2009 гг.). Повышенная концентрация в проливе Фрама и на западе Гренландского моря свидетельствует о высоком значении экспорта льда через эти ворота в зимне-весенний период. Отмечается повышенная ледовитость на севере залива Баффина.

В июле область высокого давления сместилась из центральной части Канадского бассейна к Канадскому архипелагу. Вместе с низким давлением над Беринговым морем возникающий диполь способствует восточным ветрам в морях Бофорта и Чукотском, поэтому частично уменьшение льда у берегов Аляски и материкового побережья Канады может быть вызвано движением льда. Соответственно эта адвекция может увеличить количество льда в Восточно-Сибирском море. Пониженное давление на севере Центрально-Сибирской возвышенности и повышенное над Малоземельской тундрой формируют ветра северных румбов в Карском море, однако это не вызывает адвекцию льда в указанном регионе. В связи с поверхностным таянием льда и снега над арктическим льдом устанавливается температура около 0°С, поэтому аномалии могут быть зафиксированы лишь над сушей: положительная – над о-вами Баффина, Бэнкс и хребтом Черского и отрицательная – над Западно-Сибирской равниной. Море Лаптевых почти освободилось ото льда.

В августе 2011 г. почти все арктические моря, за исключением центральной части Восточно-Сибирского моря и северо-западной части Гренландского моря, освободились ото льда. Повышенная концентрация льда в проливе Фрама свидетельствует о достаточно высоком экспорте льда. Над полюсом преобладает высокое давление, это положительная аномалия по сравнению с базовым периодом. Над Беринговым морем и Западно-Сибирской равниной сохранились поля низкого давления, поэтому над морями от Бофорта до Карского при обходе с востока на запад преобладали ветра восточных румбов. Над Верхоянскими цепями преобладала повышенная температура воздуха; преобладающие ветра могли принести это тепло в Арктику, усилив таяние льда в море Лаптевых. На севере Карского моря присутствует ледовый “язык”, вызванный адвекцией льда из центральной Арктики. Таяние льда в канадском секторе могло быть вызвано обширной зоной повышенной температуры с центром в районе о. Бэнкс и переносом этой воздушной массы ветрами вдоль побережья.

Таким образом, к сентябрю 2011 г. Арктика находилась в состоянии облегченной ледовитости по сравнению с аналогичным периодом базового десятилетия (2000–2009 гг.). Прогрев Карского моря мог быть вызван проникновением теплых атлантических вод весной 2011 г. Высокая концентрация льда в проливе Фрама может быть объяснена повышенным выносом льда через эти “во-

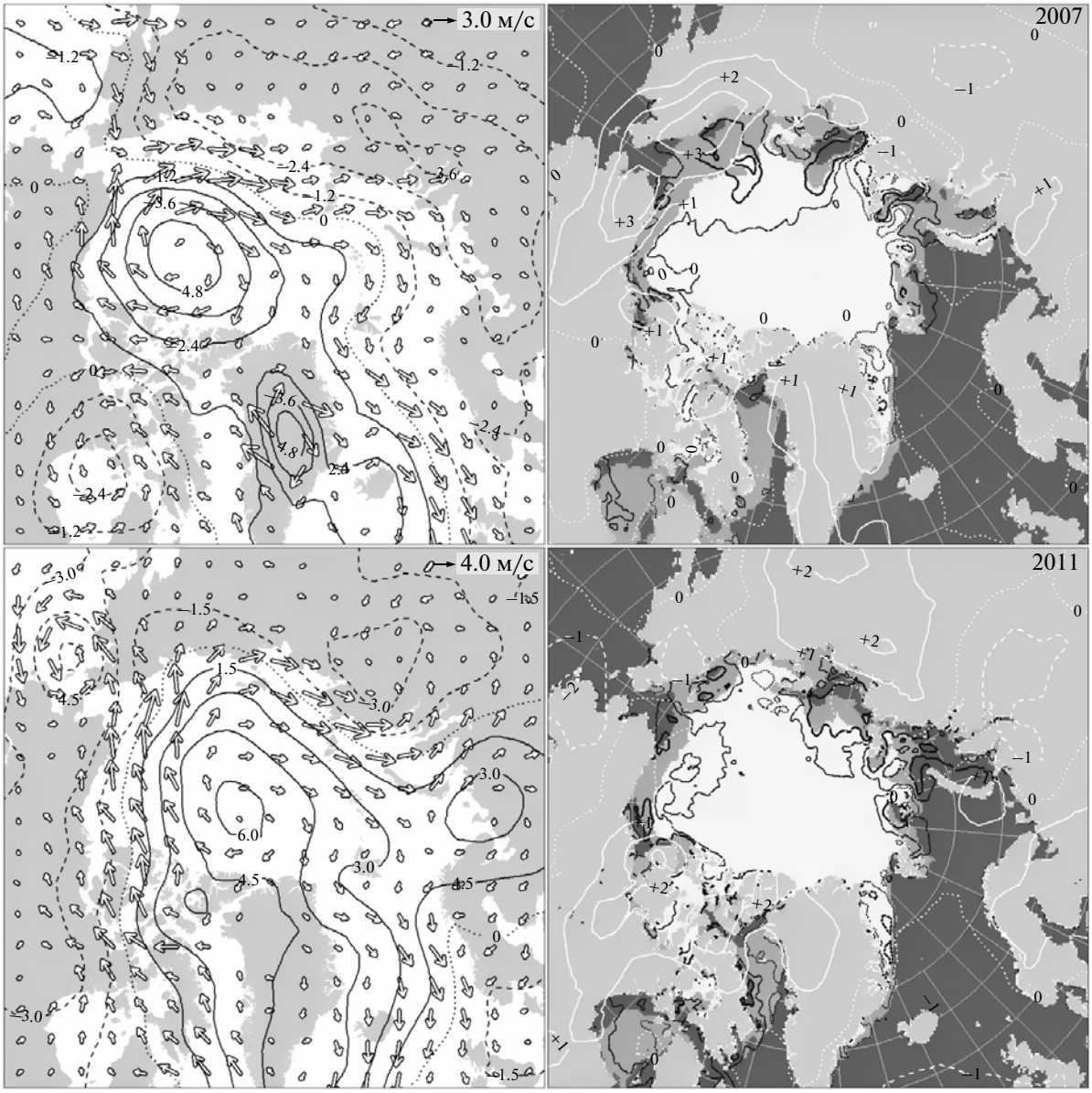


Рис. 2. Аномалии условий окружающей среды летом 2007 и 2011 гг. по сравнению с базовым периодом 2000–2009 гг.

рота", причем из-за географической особенности этого региона в основном происходит экспорт многолетнего, старого льда. Благодаря циклонической активности ветров в летние месяцы, лед из Чукотского и Лаптевых морей мог сместиться в центральную Арктику, однако атмосферная циркуляция благоприятствовала сохранению льда в Восточно-Сибирском море.

СРАВНЕНИЕ ЛЕТНИХ МИНИМУМОВ 2007 И 2011 гг.

Для выявления различий в распределении ледового покрова в сентябре 2007 г. и сентябре 2011 г. проведен сравнительный анализ атмосферных условий в летний период (июнь–август). Аномалии условий окружающей среды для этих периодов представлены на рис. 2. Верхние панели соответствуют 2007 г., а нижние – 2011 г. На левых панелях показаны: среднемесячные аномалии атмосферного давления на уровне моря (контур, гПа); скорости и направления поверхностного ветра (стрелки, линейный масштаб). На правых панелях отложены аномалия температуры поверхности (белый контур, градусы Цельсия), концентрация морского льда, классифицированная по уровням 15% и 50% тремя градациями серого – от темного к светлому, аномалии концентрации (черный контур) по уровням 15% (тонкая линия) и 30% (толстая линия), короткий пунктир соот-

ветствует положительной аномалии, длинный – отрицательной.

Как в 2007 г., так и в 2011 г., повышенная ледовитость наблюдается в проливе Фрама, таким образом, эти оба экстремальных года отличаются повышенным экспортом льда, преимущественно многолетнего.

Лето 2007 г. отличалось аномально высокими температурами воздуха на Аляске и Чукотке, тогда как в летние месяцы 2011 г. в районе Канадского архипелага было немного теплее, чем обычно за базовый период (2000–2009 гг.). Летом 2007 г. область высокого давления к северу от моря Бофорта и область низкого давления к югу от п-ова Таймыр образовывали диполь, благодаря которому воздушные массы переносились с севера Чукотского моря к архипелагу Северная Земля, восточному побережью п-ова Таймыр и на юго-запад Карского моря. Поэтому в указанных морских акваториях профицит льда мог возникнуть в результате адвекции.

Летом 2011 г. диполь давления также проявлялся, но в другом направлении: область высокого давления над полюсом и низкого – над Беринговым морем, и это могло вызвать адвекцию льда в Восточно-Сибирское море, благоприятствуя сохранению льда в западной его части.

Изменения ледового покрова в течение лета определяют концентрацию льда в период летнего минимума. Несмотря на близость количественных оценок площади морского льда в период минимальной протяженности в 2007 и 2011 гг., некоторые отличия в пространственном распределении могут быть объяснены атмосферной циркуляцией.

АНАЛИЗ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Метод главных компонент использован для выявления характерных особенностей концентрации морского льда в сентябре на основе среднемесячных данных за период 1979–2010 гг. Для каждого пиксела изображения вычислено стандартное отклонение за 32 года. Те пикселы, для которых стандартное отклонение составило менее 5% концентрации, исключены из анализа. Подавляющее большинство таких пикселов приходится на маргинальную зону Арктики, в которой за период наблюдений лед ни разу не сохранялся до сентября, и глубоководную часть арктического бассейна, для которой за 32 года наблюдений не наблюдалось уменьшения концентрации. Области с нулевой вариабельностью концентрации не могут быть использованы при анализе главных компонент, направленном на выделении особенностей по убыванию вариабельности.

В данной работе использован метод разложения по сингулярным значениям

$$X = UDV^T,$$

где X – исходная матрица, в которой по столбцам отложены переменные – отобранные географически фиксированные пикселы, а по строкам – наблюдения, значения концентраций в сентябре, с 1979 г. по 2010 г. До процедуры разложения матрица была нормализована. Число n главных компонент задавалось при разложении по сингулярным значениям. Эмпирически ортогональные функции (ЭОФ) вычисляются как $EOF = U^T$. ЭОФ представляют собой n-некоррелированных пространственных структур, отсортированных в порядке убывания вариации. Главные компоненты (ГК) вычисляются как $PC = V^T$. ГК представляют собой n-некоррелированных временных структур, связанных с пространственными структурами (ЭОФ), размерностью 32 каждая.

Собственные значения первых восьми главных компонент в процентах объясненной дисперсии равны 28.2, 10.0, 8.6, 7.2, 5.8, 4.9, 4.1, 3.3, а их кумулятивная сумма в процентах равна 28, 38, 47, 54, 60, 65, 69, 72. Таким образом, больше половины вариабельности может быть объяснено четырьмя главными компонентами. Восемь главных компонент объясняют 72% вариабельности концентрации морского льда в сентябре. Более четверти вариабельности приходится на первую компоненту.

На рис. 3 изображены первые четыре пространственные структуры (ЭОФ) в порядке убывания вариабельности, отображенной в правом верхнем углу каждой панели. Суммарная вариабельность указана в скобках там же. Первая ЭОФ охватывает почти всю центральную Арктику, за исключением глубоководной зоны с постоянно высокой концентрацией морского льда в сентябре. Наиболее значимые проявления этой структуры приходятся на область к северу от Чукотского и Восточно-Сибирского морей, чуть менее значимые – северная часть морей Бофорта и Лаптевых и проливы Канадского архипелага.

Вторая ЭОФ, на которую приходится 1/10 вариации, представляет собой диполь с выраженной положительной областью к северу от Баренцева моря и в районе пролива Фрама и отрицательной – в юго-западной части Восточно-Сибирского моря и юго-восточной части моря Лаптевых. Положительная область также наблюдается в районе Чукотского моря. Область с отрицательными значениями приходится на регион материкового стока сибирских рек и находится к югу от Великой Сибирской полыньи. Такое перераспределение льда, видимо, вызвано проявлением зональных ветров в российском секторе Арктики.

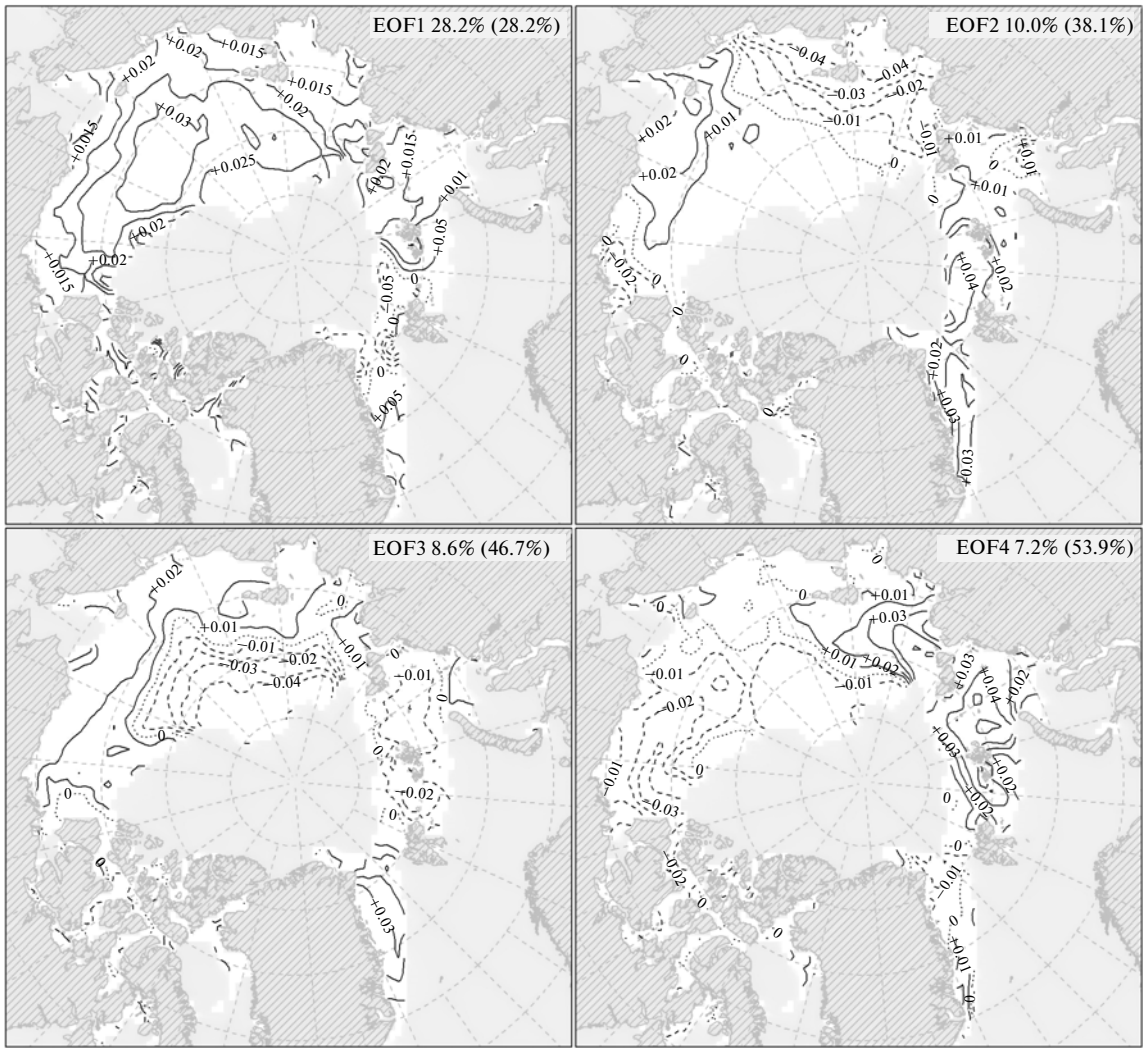


Рис. 3. Первые четыре эмпирические ортогональные функции.

На третью ЭОФ приходится почти 9% вариации концентрации льда в сентябре. Области с наибольшей контрастностью находятся в противоположных частях относительно Северного полюса, положительная – в районе пролива Фрама, отрицательная – к северу от морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Такое перераспределение льда может быть вызвано присутствием трансполярного дрейфа льда, являющегося частью арктической климатической системы. Эта особенность проявляется в следующем: лед с прилегающих морей относится в сторону полюса, и далее его движение осуществляется в сторону пролива Фрама.

Четвертая ЭОФ (7% вариации) отражает ледовитость морей Российской Арктики (Баренцево, Карское, Лаптевых), а также перераспределение льда между западным и восточным секторами Арктики.

Изменение во времени первых четырех главных компонент представлено на рис. 4.

Для первой компоненты характерно убывание в течение всего периода наблюдений, но, начиная с 2007 г., значение ГК не поднималось выше –1. Вторая компонента отличается явным минимумом в 1996 г. Этот год характеризовался как раз тем, что почти весь лед в российском секторе Арктики пережил лето, включая лед к югу от Новосибирских островов. Заметим, что в 1995 г. по этой же компоненте ситуация противоположная, на графике это соответствует положительному значению, в сентябре этого года в Лаптевых и Восточно-Сибирском морях льда было мало. Начиная с 1997 г., межгодовая вариабельность второй ГК уменьшилась. Третья компонента подчеркивает аномальность сентября 2007 г., когда огромная площадь льда частично растаяла далеко к северу от побережий Канады, Аляски, Чукотки, а частично была вынесена из этих регионов в центральную часть Арктики. Для этой компоненты отмечается небольшой отрицательный тренд. Для

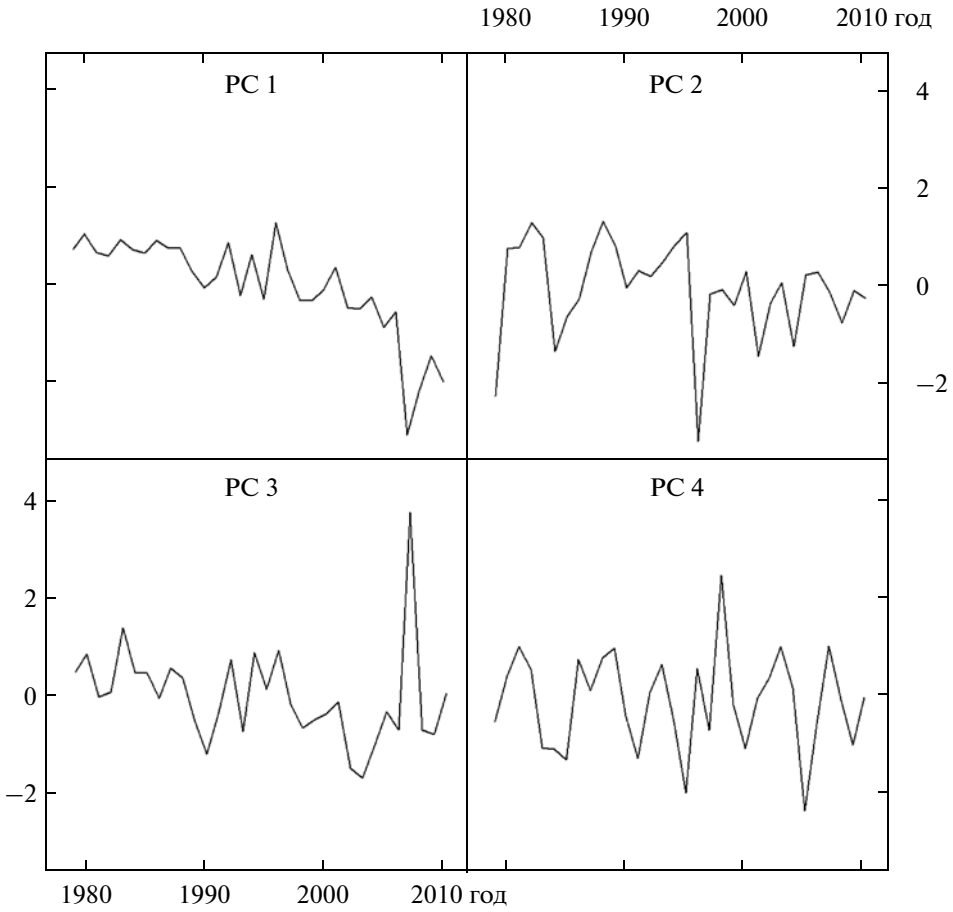


Рис. 4. Первые четыре главные компоненты концентрации льда в сентябре.

четвертой компоненты не заметна какая-либо тенденция, и межгодовая изменчивость достаточно стабильна. Максимальное значение этой ГК наблюдалось в 1998 г., а минимальное – в 2005 г. Также низкое значение этой ГК соответствует 1995 г., оба этих года (1995 и 2005 гг.) соответствуют вскрытию всех морей Российской Арктики и открытию Северо-восточного прохода.

АНАЛИЗ КАНОНИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Для растровых изображений концентрации морского льда Арктики, полученным по спутниковым данным существует такая проблема, как "проклятие размерности", которая сводится к тому, что размерность пространства переменных (количество выбранных для анализа пикселов на каждом изображении) существенно превышает размерность пространства наблюдений (количество самих изображений). Для решения этой проблемы применяются процедуры понижения размерности, которые условно можно разделить на два класса: методы выбора особенностей и методы извлечения особенностей. К первому классу можно отнести выбор узловых точек. Ко второму классу относится трансформация исходных переменных к новому набору, размерность которого ниже размерности переменных. Метод главных компонент относится ко второму классу. Для дальнейшей работы выбран анализ главных компонент как средство уменьшения размерности данных.

Концентрация льда в конце лета выбрана в качестве прогнозируемого параметра. В качестве предиктора мы рассматриваем как атмосферные параметры, так и значения концентрации, предшествующие прогнозируемому параметру на период до одного года. Метод главных компонент позволяет снизить размерность переменных, провести анализ канонических корреляций и получить прогнозируемую оценку главных компонент и дальнейшее восстановление пространственного распределения. Атмосферные параметры из атласа повторного анализа NCEP/NCAR доступны с 1948 г., таким образом, возможно оценить историческое значение концентрации с настоящего времени до середины XX в.

Выбор предиктора, прогнозируемого параметра, сроков, временных сдвигов, пространствен-

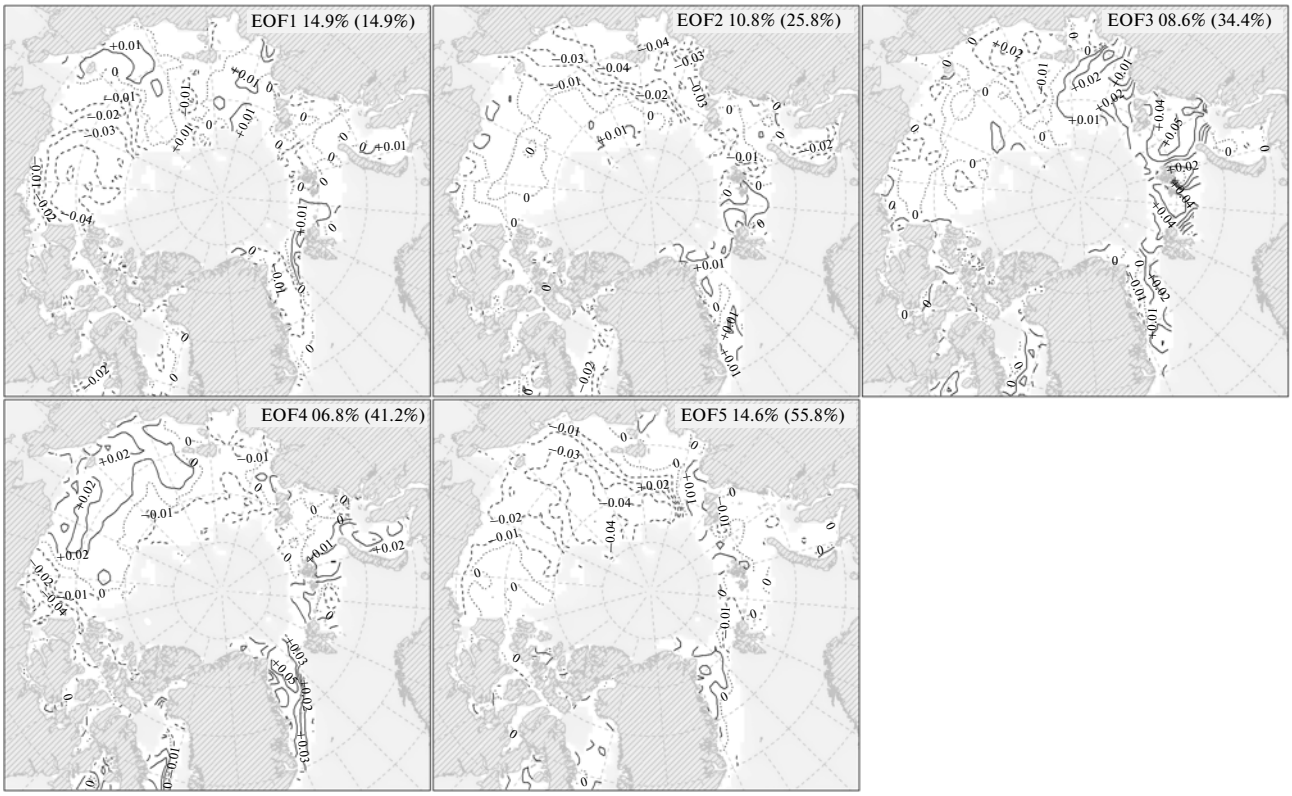


Рис. 5. Пространственные структуры концентрации льда в августе после варимакс-вращения.

ной области предиктора осуществлялся методом случайного перебора с заданными ограничениями. В качестве прогнозируемого параметра рассматривались два варианта в пространственном разрешении 50 км: концентрация льда и изменение концентрации льда за месяц (значение концентрации в текущем месяце по сравнению со значениями в предыдущем) в августе, сентябре и октябре без ограничения пространственной области. В качестве предиктора рассматривались среднемесячные оценки поверхностных параметров (температуры воздуха, давления на уровне моря, зональный и меридианный ветры) и параметров по уровням давления 1000 мб, 850 мб и усредненных по слою 500–1000 мб (температура воздуха, геопотенциальные высоты, скорость ветра в зональном и меридианном направлениях) в пространственном разрешении 200 км. Предиктор рассматривался с опережением от одного до шести месяцев. Пространственное ограничение осуществлялось как по широтам, так и по долготам, как независимо, так и одновременно. По широтам ограничение варьировалось с 30° с.ш. до 90° с.ш. с шагом 10°, но размером полосы не менее 20°. По долготам ограничение изменялось с узловой точки 0° с шагом 60°, при этом ширина сектора составляла 120°, 180° или 240°. Число главных компонент прогнозируемого параметра изменялось от 4 до 6, предиктора – от 12 до 20. Для главных компонент либо применялось вращение “Варимакс” (Kaiser, 1958) по выбранному числу компонент, либо вращение не использовалось. Первичный выбор модели осуществлялся по значениям теста χ-квадрат значимости коэффициентов корреляции канонических переменных. Далее для каждой канонической переменной проводилась кросс-валидация по методу одностраничного перелистывания (one fold out), основанного на построении модели для набора данных без одного наблюдения и сравнении результатов моделирования со значением отобранного наблюдения. Дополнительно рассматривались кросс-валидация без перестройки модели (тест) и результаты многомерной линейной регрессии с кросс-валидацией одностраничного перелистывания. В результате выбрана модель с 17-ю компонентами предиктора в виде температуры поверхностного слоя воздуха в секторе по долготе между 120° в.д. и 60° з.д. и по широте между 70° с.ш. и 90° с.ш. и 5-ю компонентами предсказываемого параметра – концентрации льда в августе.

После применения варимакс-вращения пяти главных компонент сортировка по убыванию вариации не проводилась. После вращения вариация компонент изменяется от 7 до 15%. На рис. 5 изображены полученные в результате вращения ЭОФ.

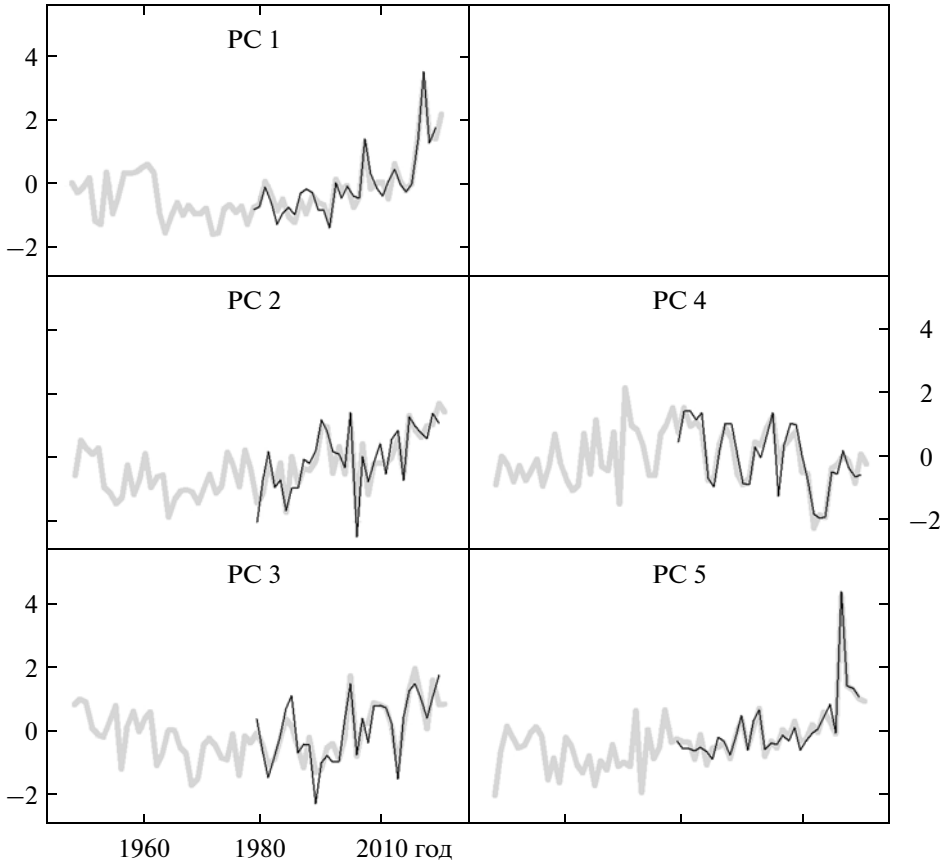


Рис. 6. Первые пять главных компонент концентрации льда в августе после варимакс-вращения.

Первая ЭОФ, главным образом, характеризует ледовитость в море Бофорта и проливах Канадского архипелага. На нее приходится 15% вариации. Вторая ЭОФ (11%) отражает зональное уменьшение концентрации льда в Восточно-Сибирском море, низкую ледовитость в море Лаптевых и западной части Карского моря и повышенную концентрацию льда в северной части Баренцева моря и проливе Фрама. Область положительных значений третьей пространственной структуры расположена на севере Баренцева моря и восточной части Карского моря, что соответствует 9% от суммарной вариации концентрации льда в августе. Четвертая ЭОФ (7% вариации) выражена в виде диполя, с положительной областью в проливе Фрама и отрицательной на востоке моря Бофорта. Возможно, эта пространственная структура является характеристикой закрученности Бофортова вихря: чем сильнее вихрь, тем меньше льда выносится из Арктики, соответственно этот лед оказывается в море Бофорта. Эта же ЭОФ имеет область слабых отрицательных значений к северу от Восточно-Сибирского моря и в море Лаптевых, область слабых положительных значений в Чукотском и Восточно-Сибирском морях, западной части Карского моря и восточной части Баренцева моря. На пятую ЭОФ приходится почти 15% вариации; она отражает значительное изменение концентрации в августе в Чукотском и Восточно-Сибирском морях.

Эволюция главных компонент показана на рис. 6.

В течение рассматриваемого периода наблюдений (1979–2010 гг.) прослеживается возрастание первой, второй и пятых главных компонент и убывание третьей и четвертой (рис. 6). Наибольшее значение первой компоненты наблюдалось в 2008 г. (низкая ледовитость моря Бофорта), а наименьшее – в 1992 г. После 1992 г. стала наблюдаться тенденция роста этой компоненты. Два соседних года, 1995 и 1996, отличаются диаметральной противоположностью в августовской ледовитости в Российском секторе Арктики. Это обстоятельство находит свое отражение в поведении второй главной компоненты, экстремумы которой приходятся на эти годы.

По предсказанию, из модели канонических корреляций построены оценки концентрации августовского льда, по временному интервалу охватывающие как спутниковую (1979–2011 гг.), так и доспутниковую (1948–1978 гг.) эры (рис. 7). В свя-



Рис. 7. Средние значения предсказанных моделью августовских концентраций в шельфовой зоне Арктики.

зи с тем, что в модель не закладывались участки поверхности с низкой вариабельностью концентрации, представляющие собой области открытой воды (концентрация льда 0%) и области "уверенных" многолетних льдов (концентрация льда 100%), пространственное распределение концентрации для этих регионов не строилось. Поэтому вместо оценок площади и протяженности использовались значения концентрации льда с географическим преобладанием для шельфовой зоны и усредненные значения концентрации для этого же региона.

По модели, самый ледовитый август пришелся на 1973 г., а самая слабая ледовитость, подтвержденная спутниковыми наблюдениями, была в 2007 г. Близки к наблюденным значениям и оценки концентрации в 1995 (низкая ледовитость) и в 1996 гг. (высокая ледовитость, особенно в Российском секторе Арктики). В целом ледовая обстановка 1950-х годов похожа на ледовую обстановку 1990-х годов. В 1960-е годы произошло увеличение ледового покрова, затем, в 1980-е, началось слабое уменьшение концентрации льда в августе, которое продолжилось до конца XX в. В новом столетии скорость уменьшения концентрации льда достигает критичных значений даже по оценкам модели.

Пространственное распределение концентрации льда в августе, предсказанное моделью канонических корреляций принципиальных компонент, представлено на рис. 8 для отдельных лет.

Две трети выборки приходятся на спутниковую эру (после 1978 г.). Характерной чертой всех отобранных карт являются отсутствие льда в южной части Карского моря и отход кромки льда на север Чукотского моря. Отмечается сходство модели и наблюдений пространственного распределения концентрации льда в 2007 г. с низкой ледовитостью далеко к северу от Восточно-Сибирского и Чукотского морей и высокой концентрацией в проливе Фрама (северная часть Гренландского моря) и западной части моря Лаптевых. В августе 2011 г., и по наблюдениям, и по модели, отмечается сохранение льда в Восточно-Сибирском море и на северо-западе моря Лаптевых.

Краткосрочный временной сдвиг между предиктором и предсказываемым параметром, составляющий один месяц, и построение модели с положительными результатами тестов свидетельствуют о наличии тесной связи между атмосферными процессами и ледовой обстановкой. На циркуляцию воздуха в июле в центральной Арктике в секторе между 120° в.д. и 60° з.д. оказывают влияние скорость таяния льда и региональный характер таяния льда. Температура воздуха выше

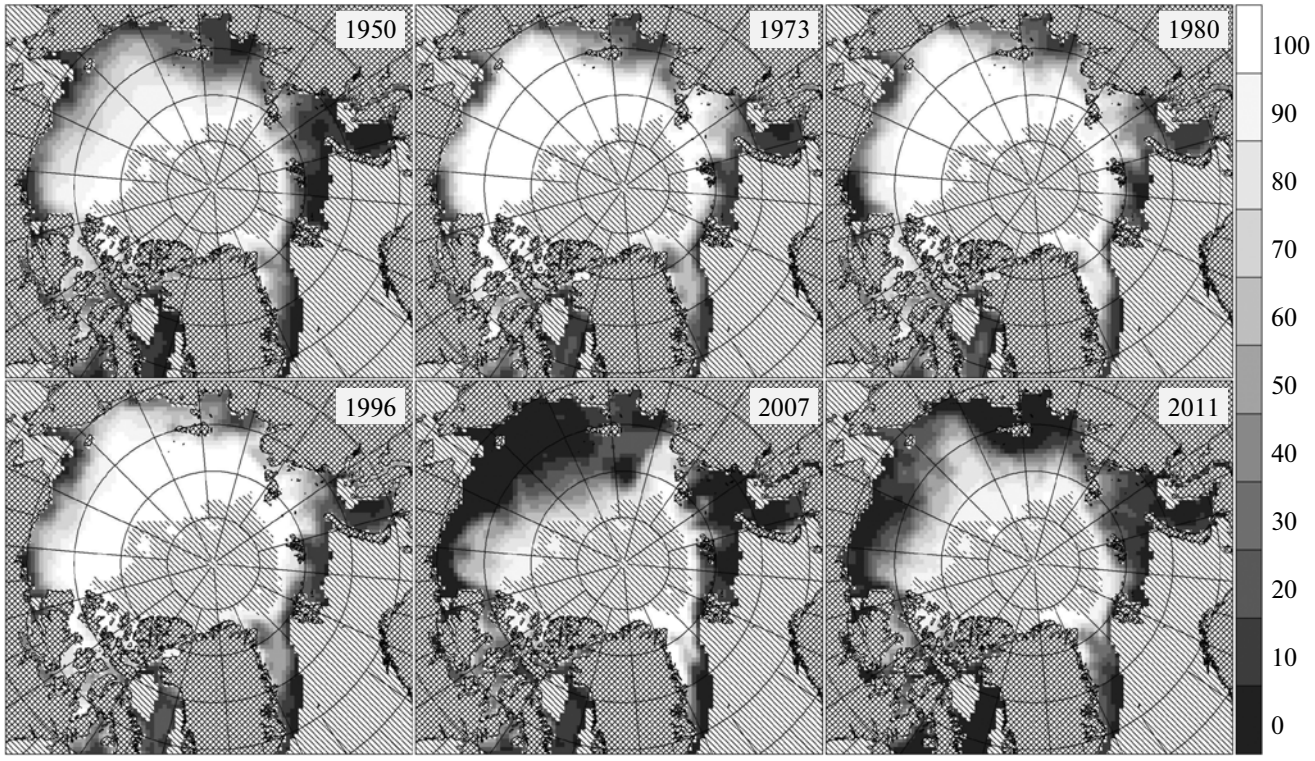


Рис. 8. Пространственное распределение предсказанных значений концентрации льда (%) для 1950, 1973, 1980, 1996, 2007 и 2011 гг.

над пространствами открытой воды, чем над ледовой шапкой. С другой стороны, повышенная температура воздуха ускоряет поверхностное таяние льда. Это эффект обратной связи арктической климатической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом по Арктике летний минимум 2011 г. приблизился к абсолютному рекорду наименьшей ледовитости, зафиксированному в 2007 г. Значение площади льда без учета прибрежной зоны в 2011 г. было даже ниже, чем в 2007 г. Возможные причины такой ослабленной ледовитости заключаются в возникновении благоприятных условий в весенне-летний период для проникновения атлантических вод далеко на восток, вплоть до Карского моря. Ослабленный Бофортов вихрь не позволил перераспределить лед, преимущественно многолетний, в центральной Арктике, и значительная часть льда вынесена в Атлантику через пролив Фрама. Позднее образование льда в центральной Арктике не позволяет льду окрепнуть настолько, чтобы пережить летнее таяние.

С помощью нелинейного сглаживания и кусочно-линейной регрессии определяется узловая точка в 2000–2002 гг. Начиная с этого момента, скорости убывания минимальной площади и протяженности льда, фиксируемые в сентябре каждого года, возрастают в 3–4 раза. При сохранении такой тенденции эпоха Арктики только лишь с сезонным льдом может наступить раньше, чем предсказывается моделями.

Использование анализа главных компонент является достаточно эффективным методом снижения размерности и выявления пространственных особенностей распределения морского льда Арктики. Использование главных компонент концентрации льда в августе и температуры воздуха в июле позволили выбрать модель для проведения анализа канонических корреляций. По прогностической составляющей построенной модели осуществлена реконструкция концентрации льда для периода с 1948 г. по настоящее время. В результате моделирования узловым моментом изменения ледовой обстановки в конце лета также является 2002 г.

С начала октября многоканальный радиометр AMSR-E, обеспечивавший возможность построения ежесуточных всепогодных карт льда с июня 2006 г., вышел из строя. Отсутствие планируемых миссий ограничивает мониторинг морского льда в умеренном (6.25 и 12.5 км) пространственном разрешении, оставляя надежду лишь на продолжение программ DMSP.

Работа выполнена при поддержке Русского географического общества (Программа изучения белого медведя в Российской Арктике) и Министерства образования и науки РФ (Федеральная целевая программа "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" – Госконтракт № 14.740.11.0410).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бельчанский Г.И., Платонов Н.Г., Еремеев В.А. Алгоритм калибровки микроволнового радиометра орбитального комплекса "ОКЕАН-01" по данным SSM/I // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 1. С. 58–69.

Belchansky G.I., Douglas D.C. Seasonal comparisons of sea ice concentration estimates derived from SSM/I, OKEAN, and RADARS AT Data // J. Rem. Sens. Environ. 2002. V. 81. № 1. P. 67–81.

Cleveland W.S., Devlin S.J. Locally-weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting // J. Amer. Stat. Assoc. 1988. V. 83. № 403. P. 596–610.

Comiso J. Bootstrap sea ice concentrations from NIMBUS-7 SMMR and DMSP SSM/I, 16 December 1978–15 January 2007. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. 2008. Digital media.

Hastie T.J. Generalized additive models. Chapter 7 of Statistical Models in S / Eds.: Chambers J.M., Hastie T.J. Wadsworth & Brooks/Cole, 1992.

Kaiser H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis // Psychometrika. 1958. V. 23. № 3. P. 187–200.

Analysis of the Arctic Sea Ice Conditions for 2011 at the Onset of Summer Minimum

N. G. Platonov, I. N. Mordvintsev, V. V. Rozhnov, I. V. Alpatsky

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow

Arctic sea ice area and extent at the onset of annual summer minimum have been estimated fro 2011 using passive microwave data. In the comparison with previous sea ice conditions during satellite era (1979 – present) the size of Arctic sea ice cap is close to an absolute minimum, which has been registered in 2007. However the spatial distribution of sea ice during summer minimum conditions in 2007 and 2011 is distinct due to different pattern of atmospheric circulation. Atmospheric conditions during period of summer ice melt, as the forcing, change the position of ice edge. Analyzing the long-term time series, it is found that since 2003 the sea ice-declining rate has increased four-fold. The linear model for short-term prediction and historical reconstruction (since mid-20th century, including pre-satellite era) of the sea ice concentration, forced by air temperature, has been developed using dimensionality reduction technique (principal component analysis) and canonical correlation analysis. The results of modeling confirm the drastic change of sea ice area at the end of summer since 2002.

Keywords: space monitoring, passive microwave radiometers, Arctic sea ice concentration, area and extent, principal component analysis, canonical correlation analysis

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 26–29

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

НАБЛЮДЕНИЕ ПРОСАДОК ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В РАЙОНЕ ПОДЗЕМНЫХ УГОЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК КУЗБАССА ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ALOS PALSAR

© 2012 г. М. И. Эпов[1], В. Л. Миронов[2], Т. Н. Чимитдоржиев[3]*, А. И. Захаров[4], Л. Н. Захарова[4], В. С. Селезнев[5], А. Ф. Еманов[5], А. А. Еманов[1], А. В. Фатеев[1]

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

[2] Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск

[3] Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

[4] Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН, Фрязино, Моск. обл.

[5] Геофизическая служба СО РАН, Новосибирск

**E-mail: tchimit@pres.bscnet.ru*

Поступила в редакцию 19.10.2011 г.

В данной работе приводятся результаты космической радиолокационной интерферометрии просадок земной поверхности в местах шахтной добычи угля в Кузбассе. На основе сопоставления данных радиолокационных и синхронных сейсмических наблюдений обнаружено, что просадки грунта хорошо коррелируют с событиями техногенной сейсмичности.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, техногенная сейсмичность, локальная геодинамика, просадки грунта, подземные выработки, лава

ВВЕДЕНИЕ

Метод космической радиолокационной (РЛ) интерферометрии является в последнее время одним из наиболее популярных в арсенале современных аэрокосмических методов и технологий дистанционного зондирования (ДЗ) Земли. Благодаря уникальной информации о состоянии подстилающих покровов, получаемой этим методом, удается решать качественно новые задачи в разнообразных междисциплинарных исследованиях. Одним из ярких примеров успешного применения метода РЛ-интерферометрии являются мониторинг объектов нефтегазового комплекса, изучение геологического строения нефтегазоносных территорий, поиск месторождений нефти и газа, в том числе в арктических регионах, контроль нефте-, газо- и продуктопроводов, а также оценка экологического состояния мест добычи и транспортировки углеводородов на суше и на море (Бондур, 2010). Одно из новых возможных приложений интерферометрии – сопровождение разработки угольных месторождений (Herrera et al., 2007; Strozzi et al., 2001; Wegmüller et al., 2000). Подземная добыча шахтным способом – один из самых опасных производств, а потому актуальной является проблема снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф, связанных с просадками и обвалами при подземных разработках угля, руды и т.д. Большинство работ в данном направлении связано с исследованием возможностей и ограничений количественной оценки (определением точности этой оценки) просадок земной поверхности на основе радарных интерферометрических и GPS измерений. В известной нам литературе отсутствуют данные по оценке влияния техногенной сейсмичности, связанной с действующими лавами (лава – подземная горная выработка с забоем большой протяженности), с просадками грунта. Кроме того, участившиеся в последнее время техногенные аварии в шахтах предполагают детальное междисциплинарное изучение всех сопутствующих процессов, включая и локальную геодинамику, для прогнозирования крупных катастроф в шахтах. Таким образом, цель данной работы заключается в исследовании взаимосвязи интенсивности и распределения эпицентров техногенных сейсмических процессов, полученных локальной сетью сейсмостанций в районе действующих лав, и локальных просадок грунта, измеренных методом РЛ-дифференциальной интерферометрии (ДРИ).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Тестовый полигон для оценки возможностей метода спутниковой ДРИ при изучении и картировании геодинамических процессов, связанных с сейсмической активизацией при разработке угля, располагался в окрестностях г. Полысаево Ке-

меровской области. Данный участок характеризуется повышенной природной и техногенной сейсмичностью, последняя пространственно связана с расположением угольных выработок (Еманов и др. 2009, 2010).

Для обнаружения деформаций подстилающей поверхности использовались данные радара L-диапазона (PALSAR), установленного на спутнике ALOS (Японское аэрокосмическое агентство, JAXA). Минимально возможный временной интервал между двумя последовательными съемками равен 46 дням (период точного повторения орбиты для интерферометрической съемки).

На первом этапе исследования было проанализировано содержимое базы данных снимков PALSAR для тестового участка Полысаево и выявлено, что в базе данных ранее проведенных съемок имеются две группы по 13 снимков, пригодные для формирования интерферометрических пар. Для каждого из 26 снимков были составлены все возможные интерферометрические комбинации и выбраны те пары снимков, которые получены при одном режиме съемки и у которых пространственная база (расстояние между орбитами) не превышает нескольких сотен метров. Малая пространственная база считается предпочтительной – из-за меньшей пространственной декорреляции. Кроме того, при малой пространственной базе рельеф на интерферограмме, а также возможные ошибки цифровой модели рельефа, использованной на этапе получения дифференциальной интерферограммы, проявляются не столь сильно. Для исследуемого участка были выбраны и обработаны следующие интерферометрические пары (год, месяц, день):

1. 20071210–20080125 (перпендикулярная компонента базы составляет 629 м);

2. 20080628–20090816 (перпендикулярная компонента базы равна 230 м);

3. 20080727–20090914 (перпендикулярная компонента базы равна 2 м);

4. 20100617–20100802 (перпендикулярная компонента базы равна 277 м).

Для компенсации влияния рельефа на дифференциальной интерферограмме использовалась цифровая модель рельефа SRTM с разрешением 90 м, а для геопривязки был использован веб-портал Google. Следует отметить, что последний стал использоваться во многих приложениях аэрокосмической тематики, а потому далее с его помощью будем представлять полученные результаты.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По всем указанным выше парам были построены интерферограммы. При этом установлено, что значительная часть площади интерферограмм для пар 2 и 3, имевших временной интервал между съемками более года, характеризовалась низким качеством из-за повышенной, а местами и полной временной декорреляции отраженных сигналов. Причинами потери корреляции (или когерентности) отражений могут быть густая растительность, водные поверхности, а также модификация мелкомасштабного рельефа вследствие активной хозяйственной деятельности, или же низкий уровень обратного рассеяния. Перечисленные факторы приводят к повышению уровня шумов на интерферограмме и, как следствие, к ошибочной интерпретации РЛ-интерферометрических измерений. По этой причине делать заключения только по одной интерферограмме необходимо с большой степенью осторожности. Например, из-за 2π неоднозначности фазовых измерений проседания за длительный интервал времени участки поверхности с резкими краями могут быть ошибочно интерпретированы как участки, где имел место подъем поверхности. По этой причине в качестве основного измерительного материала были использованы интерферометрические пары с минимально возможной короткой 46-дневной временной базой, а пары с временным промежутком более года использовались в качестве дополнительных.

Крайне важным материалом для понимания природы возможных просадок послужили данные геофизических наблюдений. В 2007–2009 гг. в указанном районе проводилась серия сейсмологических наблюдений с помощью временной сети сейсмостанций (Еманов и др. 2009, 2010). Целью этих геофизических наблюдений было исследование влияния подземной добычи угля на сейсмические активизации в регионе. Совместная обработка данных сети сейсмостанций позволила определить положение эпицентров землетрясений (см. рис. 1 на цветн. вклейках) и оценить их глубину.

На рис. 1 представлен результат интерферометрических измерений просадок поверхности по паре 20071210–20080125 по модулю 2π, где черными точками выделено расположение эпицентров сейсмособытий, зарегистрированных сетью сейсмостанций Геофизической службы СО РАН за время между РЛ-съемками. Области опускания поверхности выделяются цветными интерферометрическими полосами, имеющими форму эллипса. Поскольку полный цикл цветовой палитры соответствует просадкам на половину длины волны, равной 24 см для радара PALSAR, а в некоторых местах отмечаются вариации разности фаз до двух полных цветовых циклов, то можно полагать, что величина просадок в некоторых

точках достигает до 24 см за указанный 46-дневный промежуток времени.

Хорошее согласие распределения эпицентров с местами просадок грунта, что наблюдается в правой и левой верхней частях рис. 1, вероятно, связаны с работающими лавами Толмачёвской, Бреевской и Надбайкоимской. Пласты, в которых ведется добыча угля, залегают здесь на глубине около 400 м. Анализ данных площадных сейсмонаблюдений показал, что эпицентры техногенных землетрясений располагаются преимущественно под выработками, на глубине от 400 до 1500 м. Сравнение сейсмологических измерений за различные периоды времени показало, что сейсмические активизации смещаются в пространстве вместе с забоем (Еманов и др., 2009), а данные полевых обследований подтверждают результаты интерферометрических наблюдений о том, что в районе техногенных активизаций, приуроченных к лавам, наблюдаются локальные аномалии в форме опускания.

Вместе с тем можно видеть, что с помощью интерферометрии также выявлены участки проседания поверхности там, где техногенные подземные толчки сейсмологической сетью не зарегистрированы, например, в нижней левой части интерферограммы. Совместный анализ всех четырех интерферометрических пар и данных сети сейсмостанций (рис. 1) показывает, что вяло текущий сейсмический процесс, возникает и в других зонах аномального опускания, где нет работающих лав.

Следующая пара снимков, полученная 17 июня и 2 августа 2010 г., показывает, что в этом районе присутствует довольно сильная динамика поверхности. Временная база в данном случае также составляет 46 дней. На рис. 2 (на цветн. вклейках) представлены изолинии просадок с геопривязкой к данным веб-портала Google. Зеленым цветом выделены изолинии просадок на –2 см, голубым на –3 см, синим на –6 см, розовым на –9 см, красным на –12 см. Максимальные просадки до –13 см отмечались на небольших территориях и на данном рисунке не представлены.

В центральной части снимка выделяется область просадок, расположенная вдоль железной дороги, где подземные выработки в настоящее время не ведутся. Однако поскольку подземная добыча угля в этом регионе активно велась с 30-х годов прошлого столетия, можно полагать, что просадки в центральной части рис. 2 и в левом нижнем углу рис. 1 привязаны к ранним выработкам, информация о которых утеряна. Причиной сейсмических активизаций здесь могло быть движение поездов по железной дороге. Кроме того, не может быть оставлена без внимания гипотеза о некотором “запаздывании”, заключающемся в том, что толща грунта после сейсмособытия находится некоторое время в напряженном состоянии без значимых деформаций, а потом уже происходит просадка почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена детерминированная связь между просадками рельефа и сейсмическими событиями в зоне подземной добычи угля, наблюдаемыми одновременно с помощью космической радарной интерферометрии и сети сейсмических станций. Явления проседания поверхности наблюдаются главным образом над действующими горными выработками и, как правило, сопровождаются сейсмическими событиями. В ряде случаев деформации рельефа поверхности в зонах без выработок могут быть индикатором обрушения старых неизвестных выработок, вызванного, например, движением поездов по железной дороге. Полученные в работе результаты открывают новые возможности для изучения связи техногенных сейсмических событий с деформациями поверхности, вызванными подземной добычей угля. В конечном итоге длительные совместные сейсмические и РЛ-наблюдения позволят разработать достоверные горно-геологические модели, отражающие динамику активных горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физич. мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 37–43.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Демидова А.А., Кузнецова Ю.В., Семин А.Ю., Ворона У.И., Рубцова А.В. Наведенная сейсмичность в районе г. Полысаево (Кузбасс) // Землетрясения России в 2008 году. 2010. С. 101–107.

Herrera G., Tomás R., Lopez-Sanchez J.M. et al. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain) // Engin. Geology. 2007. V. 90. P. 148–159.

Strozzi T., Wegmiiller U., Tosl L., Bitelli G. et al. Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry // Photogram. Engin. Rem. Sens. 2001. V. 67. № 11. P. 1261–1270.

Wegmüller U., Strozzi T., Werner C. et al. Monitoring of mining-induced surface deformation in the Ruhrgebiet (Germany) with SAR interferometry // Proc. IGARSS'00. 24–28 July 2000. Honolulu. USA. 2000.

Observation of Earth's Surface Subsidence in the Area of Kuzbas Underground Coal Mining with ALOS PALSAR Radar Interferometry

M. I. Epov[1], V. L. Mironov[2], T.N. Chymitdorzhiev[3], A. I. Zakharov[4], L. N. Zakharova[4], V. S. Seleznev[5], A. F. Emanov[5], A. A. Emanov[1], A. V. Fateev[1]

[1] A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

[2] L.V. Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk

[3] Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude

[4] Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino, Moscow Region

[5] Geophysical survey, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

In this paper, we report the results of the space radar interferometry with regard to land surface subsidence observed in areas of coal mining in the Kuzbass. Analysis based on a comparison of radar data and simultaneous seismic observations revealed that subsidence events correlate well with the man-made seismicity.

Keywords: radar interferometry, technogenic seismicity, local geodynamics, land subsidence, underground workings

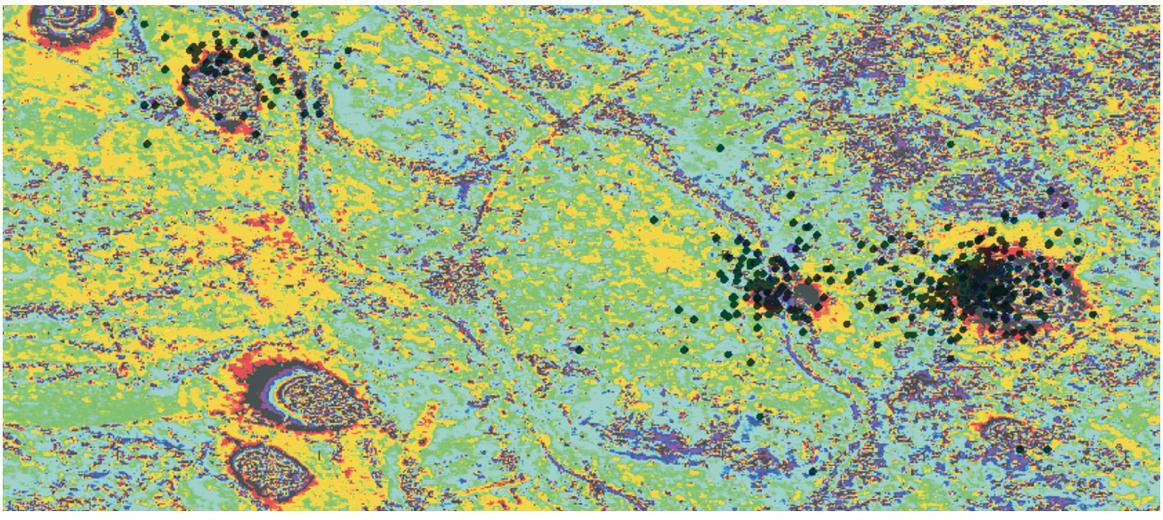


Рис. 1. Интерферограмма, полученная по паре 10 декабря 2007 г. – 25 января 2008 г.

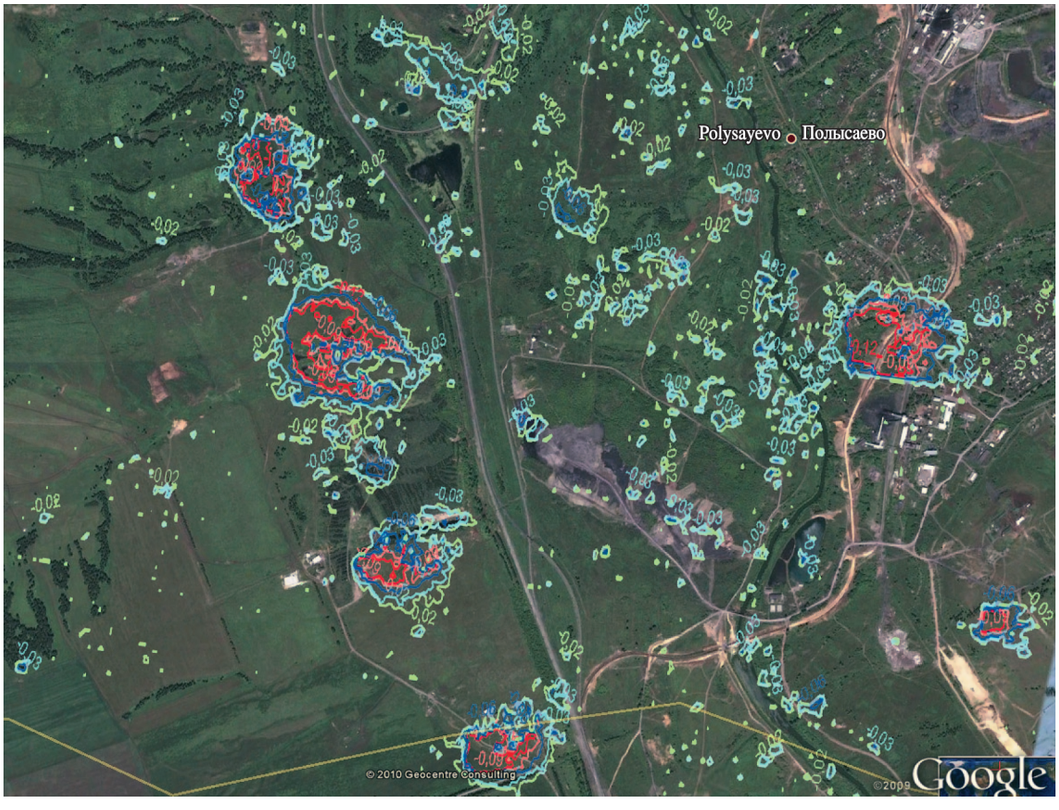


Рис. 2. Фрагмент мозаики веб-портала Google с нанесенными изолиниями просадок грунта для пары 17 июня – 2 августа 2010 г.

Issled.zemli N4-ver_Epov.indd 1 7/17/12 8:27:05 AM

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 30–46

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ЭМИССИИ ОКИСИ УГЛЕРОДА ЛЕТОМ 2010 г. В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СРЕДНЕРУССКОЙ РАВНИНЫ И ОЦЕНКА ИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ КАРТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

© 2012 г. А. Н. Сафронов[1]*, Е. В. Фокеева[1], В. С. Ракитин[1], Л. Н. Юрганов[2], Е. И. Гречко[1]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва*

[2] *Объединенный центр Земной системной технологии, Мерилендский университет Балтимора, США*

** E-mail: safronov_2003@mail.ru*

Работа посвящена оценке эмиссий окиси углерода (CO) во время пожаров аномально жаркого лета 2010 г. в центральной части Среднерусской равнины. Приводятся оценки эмиссий от лесных пожаров, полученные с использованием методик "Active Fires" (продукт MODIS – MCD14ML) и "Burned Areas" (продукт MODIS – MCD45) для карт растительности AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover, MCD12Q1. Проведены сравнение карт растительности и исследование изменений структуры состава лесов за период 2005–2009 гг. Показано, что основную неопределенность в оценку эмиссии CO дают в порядке убывания: различия в методиках подсчета эмиссий, различия в используемых картах растительности, различия в данных спутников Terra и Aqua, учет динамики изменения структуры лесов. Дополнительно для сравнения приводятся оценки эмиссий, полученные независимым методом с использованием орбитальных (MOPITT, AIRS, IASI) и наземных (Москва, Звенигород) спектроскопических измерений содержания CO.

Ключевые слова: лесные и торфяные пожары, окись углерода, карты растительности, спутниковые методы, спектроскопические измерения, моделирование переноса примесей, оценка эмиссий, Среднерусская равнина

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, изменения растительного покрова оказывают существенное воздействие на состав атмосферы посредством изменения ее свойств, как химических, так и физических, а также за счет сопутствующих химических процессов, происходящих в почвах и в биосфере (Seinfeld, Pandis, 2006). При лесных и степных пожарах в атмосферу попадает определенное количество различных газов CO, CO_2, VOC (Volatile organic compounds), CH_4, NO_x, NH_3, SO_2 и аэрозолей PM10, PM2.5 (Wiedinmyer et. al., 2006). Эмиссии от природных пожаров сильно зависят от типа сжигаемой растительности. Достоверные сведения о растительном покрове и его изменении являются ключевыми для физики и химии атмосферы при формировании различных эмиссионных сценариев.

Летом 2010 г. территория почти всей европейской части России находилась под воздействием блокирующего антициклона необычайной протяженности и длительности. На фоне повышенных температур и малого количества осадков сложилась пожароопасная обстановка, которая привела к сильным природным пожарам, и, как следствие, к экстремально высоким уровням загрязнения атмосферы в Москве и многих других населенных пунктах. Концентрации вредных примесей, в частности, окиси углерода (CO), достигали значений, в несколько раз превосходящих ПДК. Это стало отправной точкой нашего исследования.

В предыдущих наших работах, посвященных изучению загрязнения атмосферы в этот период, нами были предприняты попытки оценки мощности эмиссий от пожаров. Применение различных методик приводило к различию оценок, полученных не только нами, но и другими авторами. Попробуем изложить свои соображения по поводу причин возникновения тех неопределенностей эмиссионных оценок, с которыми нам пришлось столкнуться.

Как известно, использование спутниковых средств и методов дистанционного зондирования (ДЗ) для исследования наземных экосистем дает возможность охватывать большие территории и оценивать масштабы изменений в лесах и других типах растительного покрова. Обзор достижений спутниковых технологий для мониторинга растительности, в частности для мониторинга состояния лесов России, можно найти в работах (Барталев и др., 2006, 2010; Бондур, 2010; Галеев и др., 2008; Егоров и др., 2008; Уваров и др., 2006).

Сопоставлению различных карт растительности, использующихся в данной статье, посвящены многие работы, начиная с работы (Hansen et al.,

2000), в которой проводилось сравнение карт растительности AVHRR/UDM и GLCC для одного сенсора AVHRR/NOAA. Указанной тематики в той или иной степени касаются работы (Foody, 2002; Giri et al., 2005; Iwao et al., 2006; Jung et al., 2006; Mayaux et al., 2006; McCallum et al., 2006; See et al., 2006; Fritz et al., 2009; Iwao et al., 2011) и многие др.

Цель данной работы – уточнение мощности эмиссии CO, связанное с использованием различных карт растительности. Для сравнения карт растительности, используемых при оценке пожарных эмиссий, в работе было проведено сравнение фракций, занятых различными типами лесов. Отметим, что карты растительности, используемые различными авторскими коллективами, получены на основе космических снимков не на момент регистрации пожаров. Следовательно, динамика изменения растительности также вносит неточность в оценку эмиссий (как биогенных, так и пожарных). Поэтому дополнительно проведены исследования динамики лесов на основе имеющихся спутниковых карт экосистем 2005–2009 гг.

Кроме того, в работе используются данные наземных и спутниковых измерений полного содержания CO в столбе атмосферы, полученные для упомянутого периода на территорию Московского региона. На основе этих данных произведена валидация спутниковых измерений, а также (еще одним, независимым, методом) получены оценки мощности эмиссий CO от пожаров (Yurganov et al., 2011; Фокеева и др., 2011). Подобная валидация проводится Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА) практически с самого начала работы космических сенсоров MOPITT и AIRS (Yurganov et al., 2010).

Отметим, что ряд работ, посвященных исследованию состояния атмосферы летом 2010 г. в Московском регионе, уже опубликован или находится в состоянии публичного обсуждения, см. (Еланский и др., 2011; Фокеева и др., 2011; Kaiser et al., 2011; Konovalov et al., 2011; Witte et al., 2011; Yurganov et al., 2011). Методики измерения газовых примесей и точность измерения концентраций примесных газов в мегаполисе г. Москва, в частности CO на станциях ИФА и с помощью передвижной лаборатории TROICA, приведены в работе (Еланский и др., 2010). Спектроскопическая методика измерений полного содержания CO в вертикальном столбе атмосферы, с помощью которой проводятся измерения в Москве (ИФА) и Звенигороде (Звенигородская научная станция ИФА, далее ЗНС), описана в работах (Dianov-Klokov et al., 1989; Yurganov et al., 2002; Фокеева и др., 2011).

В настоящей работе в рассмотрение были включены следующие территории Центрального федерального округа, из которых происходил вынос основной части примеси на мегаполис: Московская, Тверская, Рязанская, Липецкая, Калужская, Нижегородская, Тульская, Владимирская, Ярославская, Ивановская, Орловская, Смоленская, Пензенская, Тамбовская области и республика Мордовия (см. рис. 1 на цветн. вклейках).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе при оценке эмиссий использовались следующие готовые карты растительности, созданные на основе спутниковых измерений:

– карта растительности UDM, сенсор AVHRR спутника NOAA (1993–1994 гг.), 13-категорий;

– карта растительности GLC-2000, сенсор VGN спутника SPOT-4 (2000 г.), 22-категории;

– карта растительности GlobCover-2005 и GlobCover-2009, сенсор MERIS спутника Envisat (2005 и 2009 гг., соответственно), 22-категории;

– карты растительности IGBP (продукт MCD12Q1), сенсор MODIS спутников Terra и Aqua (2005–2009 гг.), 17-категорий.

Поскольку в работе использовались только готовые карты растительности, сопоставления со снимками Landsat TM/ETM+/SPOT-4 HRVIR не производились.

Ниже приведены основные параметры карт растительности, используемые при расчетах эмиссий.

Классификация растительности AVHRR/UDM

Радиометр AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) устанавливается на борту метеорологических спутников NOAA (National Oceanic and Atmospheric Agency). Сенсор AVHRR/NOAA имеет пять основных спектральных каналов: канал 1 – видимый – VIS (0.58–0.68 мкм), канал 2 – ближний инфракрасный (ИК) – NIR (near infrared, 0.725–1.1 мкм), канал 3 – тепловой ИК – TIR (thermal infrared, 3.55–3.93 мкм), канал 4 – тепловой (thermal, 10.3–11.3 мкм), канал 5 – тепловой (thermal, 11.5–12.5 мкм). Пространственное разрешение AVHRR/NOAA равно 1100 м в надир, полоса обзора составляет 2399 км.

Для исследования растительного покрова использовались данные NDVI, полученные AVHRR/NOAA за период с 1 апреля 1992 г. по 30 сентября 1993 г. Широкое распространение получили карты наземных экосистем, созданные по данным сенсора AVHRR в рамках проектов International Geosphere Biosphere Programme (IGBP) (Loveland et al., 1999, 2000) и университета Мэриленд UDM (Hansen et al., 2000; Hansen, Reed, 2000; Sukhinin et al., 2004). В настоящей работе использовалось покрытие AVHRR/UDM 1 км, данные взяты с сайта http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/ftp?id=12531.

Карта растительности Global Land Cover-2000

Проект Global Land Cover 2000 (GLC-2000) был выполнен европейским сообществом (1999–2002 гг.) на основе данных спутника SPOT-4. Установленный на SPOT-4 широкоугольный датчик низкого разрешения VGN имел четыре камеры, каждая из которых работала в определенном спектральном интервале и покрывала общее поле видимости. Спектральные линии для камер VGN были следующими: в видимом диапазоне Green/B1 (0.50–0.59 мкм), Red/B2 (0.61–0.68 мкм), в ближнем ИК-диапазоне NIR/B3 (0.78–0.89 мкм) и ИК-диапазоне MIR/B4 (1.58–1.75 мкм). Оптимальный размер пискела для камер низкого разрешения VGN равен 1.165 × 1.165 км.

Расчет покрытия для GLC-2000 производился по отношению каналов NIR/RED и NIR/MIR для отдельных S-10 SPOT-4/VGN снимков в отсутствии снежного покрова и облачности. Карта растительности составлена на основе космических снимков, полученных с 01.01.2000 г. по 31.12.2000 г. Район, охваченный пожарами летом 2010 г., попадает сразу в несколько наборов: Europe (регион 8, v2.0), Northern Eurasia (регион 3, v4.0) и в глобальный набор Global Product (v1.1) (Bartalev et al., 2003; Bartholomé, Belward, 2005; Global Land Cover..., 2003).

Пример использования карты растительности GLC-2000 с 22-мя категориями растительности приведен на рис. 1. На рисунке дополнительно отмечены торфяники по данным (Stolbovoi, Savin, 2002). Расшифровка легенды растительности, показанной на рисунке под номерами 1–22, приведена в (Global Land Cover..., 2003). Числами *s*1–*s*6 обозначены основные очаги (подземных) торфяных пожаров, (см. Фокеева и др., 2011).

Классификация растительности по Global Land Cover-2000

Установленный на спутнике ENVISAT спектрометр MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument) регистрирует солнечную радиацию, отраженную от поверхности Земли в 15 полосах с длинами волн от 412.5 нм до 900 нм. Спектрометр MERIS способен давать разрешение снимков поверхности Земли в двух диапазонах: с детальным разрешением (FR – Full spatial Resolution) и панорамные снимки (RR – Reduced spatial Resolution). Снимки с разрешением FR и RR имеют пространственное разрешение 290 × 260 и 1200 × 1400 м соответственно вдоль и поперек траектории спутника.

Данные FR/MERIS были обработаны и обобщены в нескольких картах покрытия земной поверхности различными типами растительности. Подробнее см. описание на сайте (http://envisat.esa.int/handbooks/). В частности, были получены глобальные покрытия Globcover Land Cover v2.2 и v2.3 (далее GlobCover-2005 и GlobCover-2009 соответственно). Первое покрытие, захватывающее период с декабря 2004 г. по июнь 2006 г., имело 23 категории растительности, второе покрытие было получено на основе данных с января 2009 г. по декабрь 2009 г. и имело 21 категорию.

Классификация растительности по MCD12Q1

Карта растительности создана с использованием спутниковых данных MODIS/Terra и MODIS/Aqua. На настоящий момент карта растительности MCD12Q1 представлена коллекцией № 5 (V005 Land Cover Type). Имеет пространственное разрешение 500 м в отличие от коллекции № 4 (MOD12Q1, V004 Land Cover Type), имевшей разрешение 1000 м. В наборе данных MCD12Q1 представлены четыре типа классификации растительности: IGBP (Type 1), UMD (Type 2), LAI/fPAR (Type 3), NPP (Type 4).

В работе используется классификация IGBP, имеющая 17 категорий растительности. Отметим, что набор данных MCD12Q1 недостаточно хорошо документирован, в литературе чаще всего встречаются ссылки на набор MOD12Q1, V004 (Friedl et al., 2002).

СРАВНЕНИЕ КАРТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ РАСЧЕТАХ ПОЖАРНЫХ ЭМИССИЙ

Сопоставление площади лесов по различным картам растительности

Следует выделить два принципиально отличающихся подхода к формированию карт растительности: первый подход, применяемый в Национальном агентстве США по аэронавтике и изучению космического пространства (NASA), второй подход – Европейского космического агентства (ESA).

На рис. 2 представлены общая площадь лесов, а также площади хвойных, широколиственных и смешанных лесов исследуемого региона по данным карт растительности UDM/AVHRR/NOAA, GLC-2000/VGN/SPOT-4, GlobCover-2005/2009 MERIS/Envisat и MCD12Q1/MODIS/Terra/Aqua в исследуемом регионе.

Как видно из рис. 2, все карты растительности GLC-2000, GlobCover-2005/2009 и MCD12Q1 (2001–2009) дают общее количество лесов в интервале 35–45% от территории регионов. Исключение составляет карта растительности AVHRR/UDM, которая занижает общую площадь лесов и дает значение 21.27%.

Из рис. 2 видно, насколько по-разному трактуют различные группы исследователей понятия хвойных, широколиственных и смешанных лесов. Имеется некоторое сходство между хвойными категориями GlobCover и MCD12Q1 (менее 2.6%), при этом

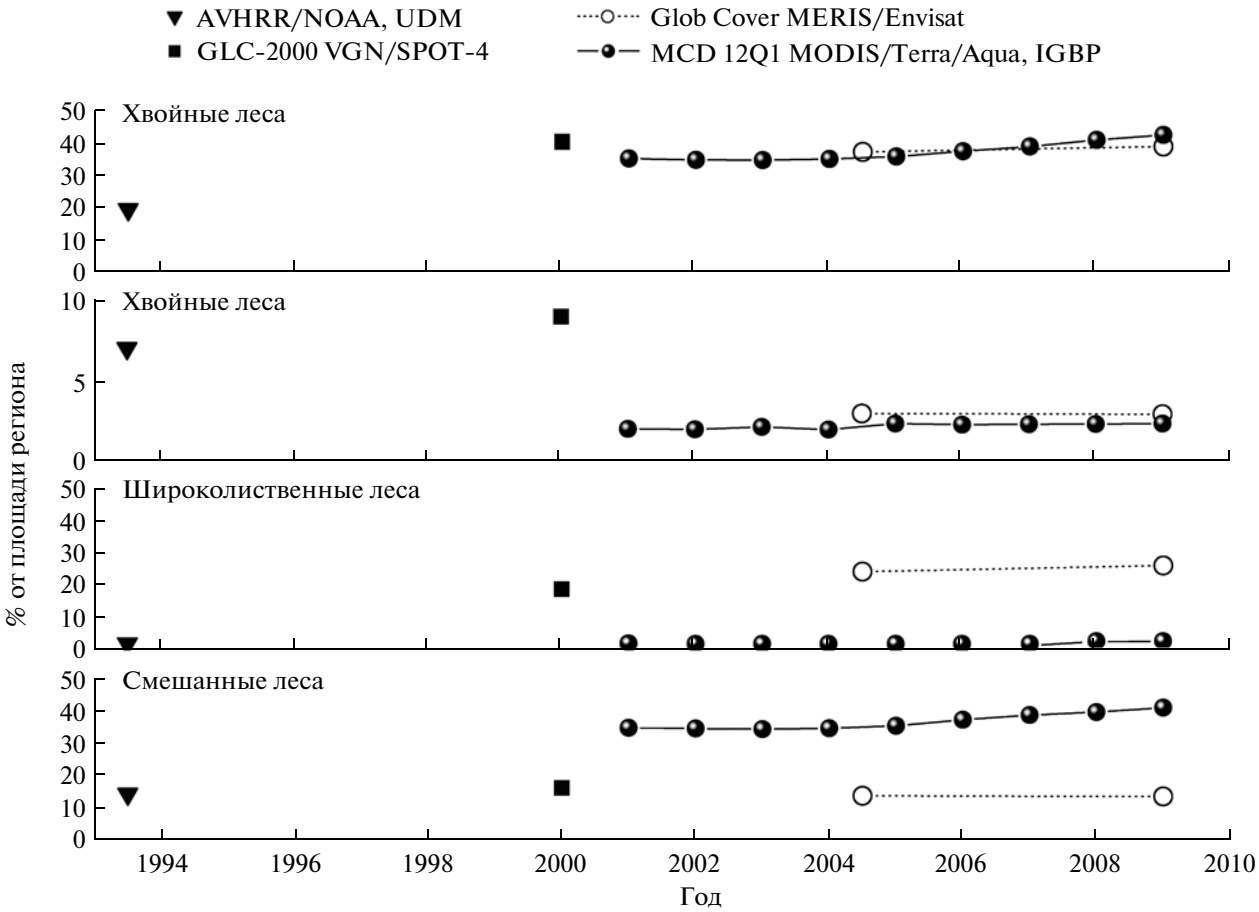


Рис. 2. Общая площадь лесов и площадь хвойных, широколиственных и смешанных лесов центральной части среднерусской равнины по данным карт растительности AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover и MCD12Q1/IGBP в процентах от площади региона.

карты растительности AVHRR/UDM и GLC-2000 дают площадь хвойных лесов 6.61 и 8.6% соответственно.

Для широколиственных лесов карты AVHRR/UDM и MCD12Q1 дают значения предельно малые, менее 2.5%, в то время как по GLC-2000 площадь широколиственных лесов в 2000 г. была 18.46% и, по данным GlobCover-2005/2009, изменялась в пределах 23.92–25.81%.

Смешанные леса, по данным карт AVHRR/UDM, GLC-2000 и GlobCover-2005/2009, составляют порядка 12–14% от площади региона, в то время как, по данным MCD12Q1, площадь смешанных лесов возрастает с 32.74 до 40.05%.

Категории растительности, отвечающие за лесной покров, полученные на основе анализа спутниковых снимков, определяются достаточно точно. В основном неточность в идентификации типа растительности определяется не столько приборными ошибками отдельных спектрометров, установленными на спутниках, сколько отличием методик в определении типа растительности, применяемыми различными исследовательскими коллективами.

Резюмируя изложенное выше, можно утверждать, что предпочтение тех или иных карт растительности будет приводить к значительной неопределенности при расчетах эмиссий.

Динамика изменения структуры лесов

Как уже отмечалось выше, динамика изменения структуры растительности также влияет на точность оценки пожарных эмиссий из-за того, что часто в расчетах используются карты растительности, составленные в предшествующие пожарам годы. Для того чтобы оценить неопределенность пожарных эмиссий из-за динамики растительности, надо сначала ответить на вопрос, насколько изменяется сама растительность. Для оценки динамики растительности выбраны карты растительности GlobCover (ESA) и MCD12Q1 (NASA) за период изменений с 2005 по 2009 гг.

В табл. 1–4 приведены данные (в процентах от площади областей, входящих в рассматриваемый регион) по изменению структуры лесов в центральной части среднерусской равнины. Для улучшения восприятия данных табл. 1–4 сорти-

Таблица 1. Общая площадь лесов в процентах от площади региона. Карта растительности GlobCover (категории – 50, 70, 100) и MCD12Q1 (категории – IGBP 1, 4 и 5)

Регион	GlobCover			MCD12Q1/IGBP		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Владимирская обл.	63.70	44.51	–4.80	53.53	62.87	2.14
Тверская обл.	59.19	61.71	0.63	65.24	73.57	1.95
Ярославская обл.	56.23	62.11	1.47	55.56	63.55	1.76
Ивановская обл.	52.95	52.92	–0.01	46.76	58.40	2.62
Нижегородская обл.	46.14	45.09	–0.26	48.85	55.95	1.62
Московская обл.	44.20	46.54	0.59	46.56	55.56	2.08
Смоленская обл.	40.04	56.43	4.10	39.48	50.48	2.72
Калужская обл.	37.67	63.19	6.38	40.55	49.31	2.16
Рязанская обл.	31.15	20.24	–2.73	23.87	27.70	0.87
Мордовская респ.	28.67	28.26	–0.10	22.44	26.53	1.01
Пензенская обл.	22.94	15.90	–1.76	12.66	17.43	1.19
Тамбовская обл.	14.22	9.73	–1.12	8.89	10.10	0.29
Тульская обл.	8.41	18.78	2.59	6.22	8.38	0.54
Орловская обл.	8.15	13.25	1.27	2.25	3.03	0.19
Липецкая обл.	7.68	9.17	0.37	4.45	5.17	0.17
Москва	4.66	8.29	0.91	15.03	17.67	0.58
Все регионы	39.00	40.67	0.42	37.57	44.23	1.56

ровка проводилась по первой колонке, в порядке убывания.

В табл. 1 приведены значения общей площади лесов и динамика ее изменения в % от площади областей за период 2005–2009 гг.

По данным GlobCover, в ряде северных областей в период 2005–2009 гг. происходило быстрое увеличение количества лесов, в то время как в южных областях Центрального федерального округа бурного роста лесов не отмечено (табл. 1).

В отличие от GlobCover, карта растительности MCD12Q1/IGBP показывает увеличение общей площади лесов во всех областях. Из сравнения карт GlobCover и MCD12Q1/IGBP видно, что для отдельных областей различаются не только абсолютные значения, но не совпадают и тенденции изменения общей фракции лесов. Так, например, во Владимирской области по данным GlobCover наблюдается катастрофическое падение площади лесов (–4.8%), в то время как по данным MCD12Q1/IGBP наблюдается бурный рост лесов (2.14%).

Отметим, что коэффициенты корреляции R между общей площадью лесов по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP высоки и составили 0.96 и 0.93 для 2005 и 2009 гг. соответственно (см. рис. 3). Стандартные отклонения SD между двумя картами растительности были равны 5.77 (2005 г.) и 9.07 (2009 г.). Коэффициенты линейной регрессии B были близки к 1, и составили 0.95 в 2005 г. и 1.06 в 2009 г.

В работе также проводилась оценка динамики изменения хвойных, широколиственных и смешанных лесов. Статистические данные по хвойным лесам приведены в табл. 2. Из сопоставления карт растительности нельзя сделать однозначный вывод об уменьшении площадей, занятых хвойными лесами.

Отметим, что коэффициенты корреляции R между площадью хвойных лесов по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP невысоки и составляют 0.69 (2005 г.) и 0.63 (2009 г.). Стандартные отклонения SD между двумя картами растительности были равны 1.15 (2005 г.) и 1.37 (2009 г.). Коэффициенты линейной регрессии B были близки к 0.5 и составили: 0.49 (2005 г.) и 0.56 (2009 г.).

Изменение сплошных широколиственных лесов и смешанных лесов представлено в табл. 3 и 4.

Как уже отмечалось, различные исследователи по-разному трактуют понятие широколиственных и смешанных лесов (см. рис. 1). Так, AVHRR/UDM и MCD12Q1/IGBP классификации NASA практически не регистрируют широколиственные леса средней полосы (UDM, IGBP класс 4), перенося эти леса в категорию смешанных лесов (класс 5). При этом европейская классификация по спутниковым данным ESA достаточно устойчиво выделяет категории широколиственных и смешанных лесов Среднерусской

Таблица 2. Площадь хвойных лесов в процентах от площади региона. Карты растительности GlobCover (категория – 70) и MCD12Q1 (категория IGBP-1)

Регион	GlobCover			MCD12Q1/IGBP		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Московская обл.	11.31	11.50	0.05	3.69	5.27	0.39
Владимирская обл.	6.07	3.32	–0.69	3.90	3.72	–0.05
Ивановская обл.	2.82	1.69	–0.28	1.63	1.62	0.00
Рязанская обл.	2.76	1.27	–0.37	1.65	1.55	–0.03
Москва	2.72	3.43	0.18	1.91	4.38	0.62
Тверская обл.	2.23	1.94	–0.07	4.11	3.97	–0.04
Ярославская обл.	2.12	1.79	–0.08	0.81	0.90	0.02
Мордовская респ.	1.85	1.72	–0.03	1.02	0.57	–0.11
Нижегородская обл.	1.83	1.00	–0.21	3.34	2.62	–0.18
Калужская обл.	1.78	4.02	0.56	0.27	0.63	0.09
Смоленская обл.	1.35	2.26	0.23	0.28	0.39	0.03
Пензенская обл.	0.55	0.72	0.04	0.49	0.46	–0.01
Липецкая обл.	0.42	1.29	0.22	0.66	0.59	–0.02
Тамбовская обл.	0.35	1.41	0.26	0.31	0.17	–0.03
Орловская обл.	0.11	1.97	0.46	0.04	0.04	0.00
Тульская обл.	0.03	1.06	0.26	0.03	0.13	0.03
Все регионы	2.56	2.52	–0.01	1.93	1.94	0.00

равнины (см. GLC и GlobCover на рис. 2). В такой ситуации сопоставление карт растительности GlobCover и MCD12Q1/IGBP для сплошных широколиственных лесов и смешанных лесов теряет всякий смысл.

По этой причине динамику изменения лесов приведем только по GlobCover. Динамика широколиственных лесов не однозначна: так, в северных областях (Калужской, Смоленской, Тверской и Ярославской) наблюдается быстрый рост широколиственных лесов. В южных областях рост широколиственных лесов отмечен только в Тульской области. Предположительно быстрый рост широколиственных лесов происходит в результате роста березняка на заброшенных пахотных землях и лугах (более подробно см. табл. 3).

Отметим, что коэффициенты корреляции R между площадью смешанных лесов по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP высоки и составляют 0.93 (2005 г.) и 0.97 (2009 г.). Стандартные отклонения SD между двумя картами растительности были равны 8.20 (2005 г.) и 5.50 (2009 г.). Коэффициенты линейной регрессии B были 2.5 (2005 г.) и 3.1 (2009 г.).

Динамика изменений площади населенных пунктов и пахотных угодий напрямую не связана с динамикой изменения структуры лесов. В то же время отметим, что изменения площадей населенных пунктов и пахотных угодий являются социально значимыми. В табл. 5 приведена динамика изменений площади населенных пунктов и пахотных угодий по данным GlobCover. Так как площадь населенных пунктов и городов существенно меньше общей площади региона, то для наглядности изменение площади городов и населенных пунктов выражено в процентах от площади, занимаемой городами и населенными пунктами в 2005 г.

Площадь городов и поселений (GlobCover – 190 категория) практически повсеместно уменьшается, в том числе и в тех областях, где в период 2005–2009 гг. бурно развивалось сельское хозяйство. В ряде южных областей наблюдается резкий рост площадей пахотных земель за счет уменьшения 30-, 110- и частично 20-й категорий GlobCover, проще говоря, за счет возврата в оборот бывших пахотных угодий. В северных областях отмечается предельно низкий уровень развития сельского хозяйства, при этом пахотные угодья занимают <10% от площади региона (см. табл. 5), наблюдается их быстрая деградация.

Отметим, что параметры корреляции между площадью пахотных земель по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP составляют ($B = 3.2$, $R = 0.78$, $SD = 19.97$) для 2005 г. и ($B = 2.0$, $R = 0.98$, $SD = 5.95$) для 2009 г.

Параметры корреляции между площадью населенных пунктов по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP составляют ($B = 0.98$, $R = 0.99$,

Таблица 3. Площадь широколиственных лесов в процентах от площади региона. Карты растительности GlobCover, (категория – 50) и MCD12Q1, (категория IGBP-4)

Регион	GlobCover			MCD12Q1/IGBP		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Ярославская обл.	35.30	42.24	1.73	0.37	1.77	0.35
Ивановская обл.	31.77	32.06	0.07	0.13	0.51	0.09
Тверская обл.	31.72	40.05	2.08	0.56	1.65	0.27
Владимирская обл.	31.02	19.87	–2.79	0.28	0.71	0.11
Нижегородская обл.	30.85	31.20	0.09	0.89	0.90	0.00
Смоленская обл.	30.42	41.05	2.66	2.51	5.94	0.86
Калужская обл.	24.86	41.55	4.17	1.46	3.85	0.60
Мордовская респ.	20.81	19.68	–0.28	3.20	3.42	0.05
Пензенская обл.	20.50	11.85	–2.16	4.62	6.31	0.42
Рязанская обл.	18.27	11.90	–1.59	1.57	1.72	0.04
Московская обл.	17.72	16.84	–0.22	0.49	0.90	0.10
Тамбовская обл.	10.38	4.95	–1.36	0.94	1.47	0.13
Тульская обл.	8.26	16.63	2.09	1.56	2.33	0.19
Орловская обл.	7.56	10.04	0.62	0.46	0.86	0.10
Липецкая обл.	5.59	5.82	0.06	0.57	0.90	0.08
Москва	1.21	0.98	–0.06		0.12	0.03
Все регионы	23.92	25.81	0.47	1.29	2.24	0.24

$SD = 0.18$) для 2005 г. и ($B = 0.99$, $R = 0.99$, $SD = 0.14$) для 2009 г.

В целом в заключение всего этого раздела следует отметить, что основная причина описанных нами неопределенностей и разночтений обусловлена различиями в подходах NASA и ESA к составлению карт растительности. Также анализ показал, что изменения растительности за период с 2005 по 2009 гг. значительно меньше, чем отличия в схожих категориях растительности для разных карт (см. коэффициенты корреляции).

ОЦЕНКА ЭМИССИЙ ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Как уже отмечалось выше, эмиссии при пожарах сильно зависят от типа сгоревшей растительности. Наибольший вклад в эмиссии при одинаковой площади возгорания дают лесные пожары, так как в лесах значительно выше плотность растительности. Представляется интересным использовать полученные выше разные карты растительности для оценки ошибки при определении эмиссий от лесных пожаров.

Непосредственно для оценки пожарных эмиссий использовалась типичная методика расчета (Wiedinmyer et al., 2006). Расчет эмиссии i-примеси (частной эмиссии) производился по общей формуле

$$Emission_i = A\ B\ CE\ e_i,$$

где: A – площадь пожара; B – площадь растительности, кг/м^2; CE – фракция сгоревшей при пожаре биомассы; e_i – эмиссия i примеси на кг сгоревшей биомассы, г/кг.

В работе (Wiedinmyer et al., 2006) расчет производился для набора карт растительности GLC-2000 North America, имеющего 29 категорий растительности. Напомним, что используемая в настоящей работе карта GLC-2000 Global имеет 23 категории растительности. Данные по эмиссиям примесей на единицу сгоревшей биомассы брались из оригинальной работы (Wiedinmyer et al., 2006) и аппроксимировались на соответствующие категории других карт растительности.

Кроме этого, для сравнения результатов применялась методика оценки эмиссий, основанная на использовании Fire Radiation Power (далее FRP) (Wooster et al., 2006). Расчет эмиссии i-примеси (частной эмиссии) для FRP методики производился по общей формуле

$$Emission_i = k\ Q\ e_i,$$

где: $Q = 0.368\ FRM$ (МВт); Q – скорость горения, кг/с; e_i – эмиссия i примеси на кг сгоревшей биомассы, г/кг; k – коэффициент перевода, с/сут.

Анализ сгоревших площадей производился по методикам Active Fires (методика оперативного подсчета общего количества и площади пожаров в ИК-диапазоне) (Justice et al., 2002; Giglio et al., 2006; Giglio, 2010), и Burned Areas (методика оценки об-

Таблица 4. Площадь смешанных лесов в процентах от площади региона. Карты растительности GlobCover, (категория – 100) и MCD12Q1, (категория IGBP-5)

Регион	GlobCover			MCD12Q1/IGBP		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Владимирская обл.	26.61	21.31	–1.32	49.34	58.44	2.27
Тверская обл.	25.24	19.71	–1.38	60.56	67.95	1.85
Ярославская обл.	18.81	18.09	–0.18	54.39	60.88	1.62
Ивановская обл.	18.36	19.17	0.20	45.00	56.26	2.82
Московская обл.	15.16	18.20	0.76	42.38	49.40	1.75
Нижегородская обл.	13.46	12.89	–0.14	44.63	52.43	1.95
Калужская обл.	11.03	17.63	1.65	38.82	44.83	1.50
Рязанская обл.	10.11	7.07	–0.76	20.64	24.43	0.95
Смоленская обл.	8.26	13.12	1.22	36.69	44.15	1.86
Мордовская респ.	6.01	6.86	0.21	18.22	22.54	1.08
Тамбовская обл.	3.49	3.38	–0.03	7.64	8.46	0.21
Пензенская обл.	1.89	3.33	0.36	7.55	10.66	0.78
Липецкая обл.	1.67	2.06	0.10	3.22	3.67	0.11
Москва	0.73	3.88	0.79	13.12	13.18	0.02
Орловская обл.	0.48	1.23	0.19	1.76	2.13	0.09
Тульская обл.	0.11	1.09	0.24	4.64	5.93	0.32
Все регионы	12.53	12.34	–0.05	34.35	40.05	1.42

щей площади, пройденной пожарами, по изменению цвета растительности, продукт MCD45A1 MODIS) (Roy et al., 2008; Boschetti et al., 2009).

Местоположение пожаров при расчетах по методике Active Fires определялось по наборам данных MCD14ML (Global Monthly Fire Location Product), подготовленных Университетом Мэриленда (University of Maryland, Department of Geography), ftp-сервер fuoco.geog.umd.edu (Giglio, 2010). Набор представляет положение пожаров, температуру пиксела по ИК-каналам MWIR-21 (T21, 3.929–3.989 мкм) и MWIR-31 (T31, 10.780–11.280 мкм), радиационную мощность источника (FRP, Fire radiative power) и вероятность достоверности обнаружения очагов пожаров (conf, Detection confidence) (см. (Justice et al., 2002) и modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php)).

В работе использовались GIS-технологии геоинформационной системы (ГИС) ArcInfo, которые позволили, основываясь на данных наборов AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover-2009 и MCD12Q1/IGBP, вычислить как суммарное количество сгоревших площадей, так и количество площадей по различным категориям растительности.

На рис. 4*а*, *б* (на цветных вклейках) приведены местоположения пожаров за период 01.08.2010–09.08.2010 по данным MCD14ML (AF) и по данным MCD45 (BA) вблизи крупного подземного торфяного пожара *s*1 на границе Московской и Рязанской областей. В качестве нижнего слоя выложен снимок GoogleEarth, на котором видна дренажная система. Дополнительно были выложены категории 210 и 180 (не приведена на рис.) Envisat/MERIS, показывающие наличие воды на территории торфяника в 2009 г. Сопоставление рис. 4*а* и 4*б* показывает, насколько плохо продукт MCD45 описывает пожары на торфяниках и в торфолесах.

В табл. 6 и 7 приведено количество очагов пожаров в исследуемом регионе летом 2010 г. (01.06.2010–01.09.2010) вблизи г. Москвы по методикам Active Fires (далее AF) и Burned Areas (далее BA). В таблицах дополнительно приведены данные по социально значимым объектам, таким, как пашни и населенные пункты.

Согласно методике AF, количество зарегистрированных пожаров спутником Aqua на 16.3% меньше по сравнению с количеством пожаров, зарегистрированных спутником Terra. По методике BA спутники регистрируют на 30.2 и 41.6% меньше пожаров, чем по методике AF для спутников Aqua и Terra соответственно.

При этом количество пожаров в лесах в процентах от общего количества зарегистрированных пожаров по методике AF колеблется от 35% до 75%. При этом карты растительности GLC-2000 и MCD12Q1 показывают, что горят в основном леса (>50%), в то время как из данных GlobCover следует, что в лесах было всего 35% пожаров.

По методике BA следует, что леса в этот период практически не горели. Количество пожарных пикселов изменяется в диапазоне 16–32% от общего числа возгораний.

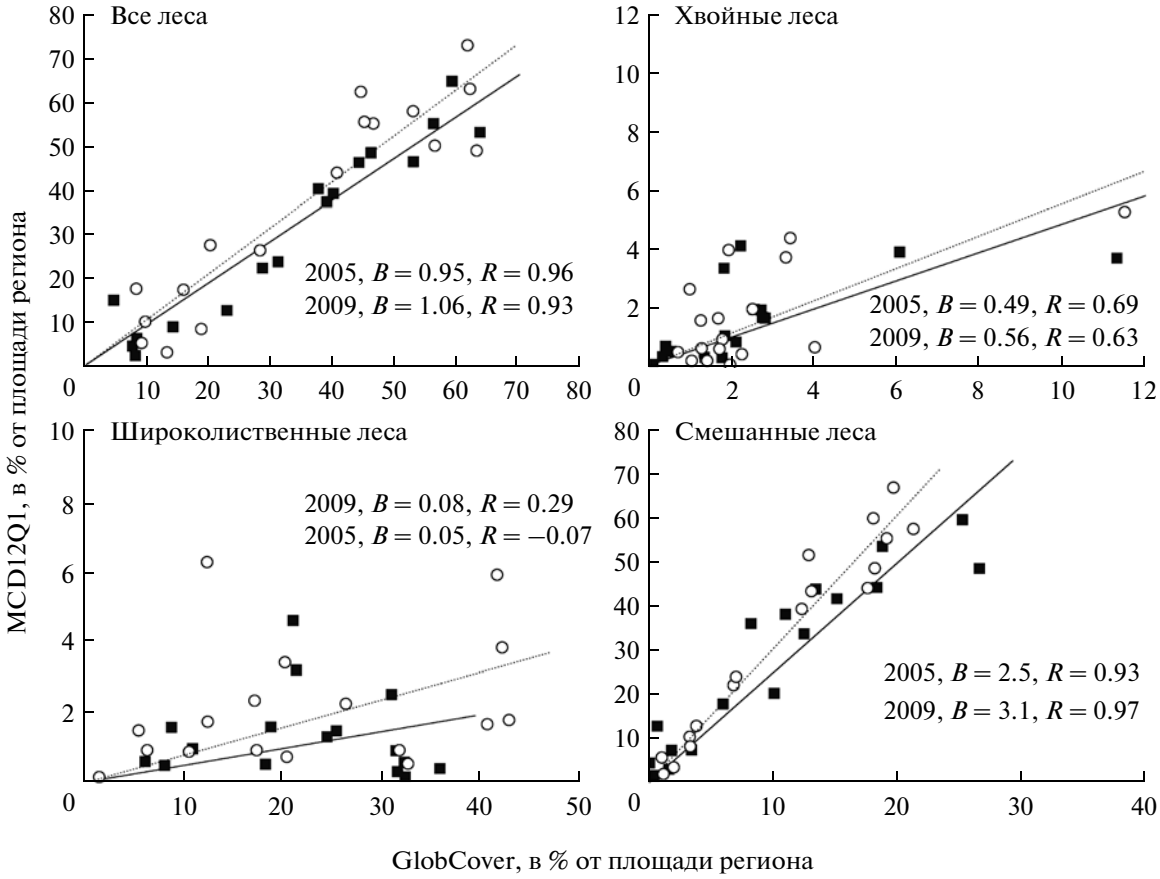


Рис. 3. Коэффициенты корреляции между площадью центральной части среднерусской равнины для категорий карт растительности GlobCover и MCD12Q1/IGBP за 2005 и 2009 гг.

Таким образом, общий диапазон изменения процента возгораний лесов варьируется в пределах 16–75% от общего количества зарегистрированных пожаров в зависимости от методики регистрации факта пожара (AF или BA) и от типа карты растительности.

В этой ситуации сравнение количества пожаров в отдельных типах лесов теряет всякий смысл. Например, количество пожаров для широколиственных лесов по методике AF меняется более чем в 50 раз: (29 очагов по связке AVHRR/UDM – MODIS/Aqua и 1553 очага пожаров для GlobCover-2009 – MODIS/Terra).

Для социально значимых объектов, таких, как пашни, отметим следующее: число возгораний на пахотных землях составляет 5.8–11.3% по методике AF и 29.0–56.6% по методике BA. Методика BA практически не позволяет определить возгорания на территории населенных пунктов. По AF число возгораний в населенных пунктах изменялось в диапазоне 142–227 шт.

Резюмируя эту часть исследования, можно сделать вывод о том, что методика BA несколько лучше регистрирует пожары на полях, в то же время сильно занижает число возгораний в лесах. Детализация категорий леса, в котором произошло возгорание, затруднительна из-за недостатков имеющихся карт растительности. Наиболее адаптированными для центральной части среднерусской равнины являются карты GLC-2000 и GlobCover-2009, но и для них количество пожаров отличается почти в 2 раза (в 1.8 и 1.9 для Aqua и Terra соответственно).

В табл. 8 и 9 приведены рассчитанные эмиссии окиси углерода от пожаров в лесах с использованием различных карт растительности по методикам определения площади пожаров AF и BA. Отметим, что методика, основанная на использовании FRP, сильно занижает эмиссию от лесных пожаров (см. табл. 10). Причина этого заключается в низких средних значениях $FRP_{ср}$, равных 45.58, 67.57 и 56.17 МВт (по данным Terra, карта GLC-2000) для сплошных листопадных широколиственных лесов, вечнозеленых хвойных лесов и смешанных лесов соответственно.

Средняя эмиссия по всем картам растительности, диапазон изменения и стандартное отклонение приведено в табл. 11. Отличие эмиссий, рассчитанных по методике BA для карты растительности AVHRR/UDM, от эмиссии, рассчитанной

Таблица 5. Общая площадь пахотных земель (GlobCover, категории – 14) в процентах от площади региона и площадь населенных пунктов в процентах от площади населенных пунктов в 2005 г. (GlobCover, категории – 190)

Регион	GlobCover-14			GlobCover-190		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Липецкая обл.	19.12	44.75	6.41	0.87	0.85	–2.35
Тамбовская обл.	14.92	43.71	7.20	0.35	0.34	–3.43
Орловская обл.	23.05	36.61	3.39	0.36	0.36	0.65
Тульская обл.	21.28	30.47	2.30	0.66	0.63	–3.91
Пензенская обл.	10.88	27.22	4.09	0.42	0.39	–6.13
Мордовская респ.	14.15	19.52	1.34	0.36	0.33	–7.08
Рязанская обл.	12.59	19.06	1.62	0.26	0.26	–0.21
Нижегородская обл.	10.04	11.31	0.32	0.55	0.50	–9.53
Калужская обл.	14.09	10.74	–0.84	0.36	0.32	–11.63
Московская обл.	11.52	10.40	–0.28	2.52	2.25	–10.84
Смоленская обл.	11.92	9.90	–0.50	0.20	0.13	–33.02
Ивановская обл.	10.81	9.45	–0.34	0.59	0.56	–5.71
Ярославская обл.	10.78	8.18	–0.65	0.40	0.34	–14.68
Владимирская обл.	7.87	7.19	–0.17	0.47	0.41	–11.61
Тверская обл.	7.12	5.87	–0.31	0.11	0.09	–15.89
Москва	1.66	1.94	0.07	75.67	74.70	–1.27
Все регионы	12.03	16.64	1.15	0.69	0.63	–7.78

по методике AF для карты MCD12Q1/IGBP, более чем на порядок (меньше в 12.45 раз).

Отметим, что за рубежом в последнее время активно развиваются спутниковые дистанционные методы измерения полного содержания различных примесей, в частности, CO. Эти методы относительно новые (начало работ приходится на конец 1990-х годов), и им присущ один серьезный недостаток, а именно – невысокая чувствительность к приземному (ниже 2000 м над поверхностью Земли) слою. В частности, орбитальные спектрометры MOPITT/Terra и AIRS/Aqua, регистрирующие спектры поглощения собственного теплового излучения Земли в области 4.6 мкм (для CO), см. (Aumann et al., 2003; Deeter et al., 2003), зафиксировали летом 2010 г. содержание CO для Москвы, в 2–3 раза меньшие по сравнению с наземными спектрометрами (Фокеева и др., 2011; Yurganov et al., 2011). Несколько лучшие результаты показал спектрометр IASI/Metop-A (Hebert et al., 2004).

Эмиссия CO от пожаров в России летом 2010 г. была получена независимым методом по данным наземных и спутниковых измерений с использованием балансовой модели (Фокеева и др., 2011; Yurganov и др., 2011). Общая эмиссия за июль-август 2010 г. составила: 34 (17) Тг, 40 (22) Тг и 36 (26) Тг (AIRS, MOPITT и IASI соответственно), в скобках – значения эмиссий до внесения поправок с учетом наземных спектроскопических измерений с точностью ±30% (табл. 11). Эти значения несколько превышают оценку, полученную по методике AF, хотя разница не выходит за пределы погрешности метода. На рис. 5 приведены суточные эмиссии CO по балансовой модели по измерениям, полученным с MOPITT, AIRS и IASI. Дополнительно в виде точек приведены результаты расчетов суточных эмиссий CO по методике AF. Как видно из рис. 5, временные ходы эмиссии хорошо согласуются.

В табл. 12 дополнительно приведены данные расчетов эмиссий CO для областей вокруг Московского мегаполиса за период 01.07.2010–01.09.2010 (в Тг) для всех категорий растительности. Для сопоставления приводятся данные по эмиссионным наборам GFASv1 и GFEDv3.1, пересчитанные для исследуемого в работе региона. Кроме этого, приводятся результаты расчета по методике maxFRP (Konovalov et al., 2011). Как следует из табл. 12, эмиссии по GFASv1 на порядок превышают значения эмиссий, полученные с помощью GFEDv3.1.

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе определена общая площадь лесов, а также площадь хвойных, широколиственных и смешанных лесов Московской, Тверской, Рязанской, Липецкой, Калужской, Нижегородской, Тульской, Владимирской, Ярославской, Ивановской, Орловской, Смоленской, Пензен-

Таблица 6. Количество (в шт.) очагов возгорания в лесах по данным MCD14ML (MODIS/Terra и Aqua) и картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009, MCD12Q1-2009. Дополнительно приведены данные по социально значимым объектам, таким как пашни и населенные пункты. Регион – центральная часть Среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карты растительности							
	AVHRR/UDM		GLC-2000		GlobCover-2009		MCD12Q1-2009	
	MCD14ML							
	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra
хвойные леса	3649	4532	5208	6213	539	695	1039	1218
широколиственные леса	29	33	998	1223	1281	1553	65	82
смешанные леса	1387	1615	2086	2552	2495	3193	8020	9717
все леса, шт.	**5066**	**6193**	**8292**	**9988**	**4314**	**5442**	**9124**	**11031**
все леса, %*	**41.09**	**42.05**	**67.25**	**67.82**	**34.99**	**36.95**	**74.00**	**74.90**
пашни, шт.	1163	1396	1385	1569	720	879	1395	1652
пашни, %*	9.43	9.48	11.23	10.65	5.84	5.97	11.31	11.22
населенные пункты**	–	–	142	193	151	227	169	217
Всего очагов возгорания	12330	14728	12330	14728	12330	14728	12330	14728

Примечание.* – В процентах от общего количества возгораний; ** – категория в AVHRR/UDM отсутствует.

Таблица 7. Количество (в шт.) пожарных пикселей MCD45 по картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009, MCD12Q1-2009. Дополнительно приведены данные по социально значимым объектам, таким как пашни и населенные пункты. Регион – центральная часть Среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карты растительности			
	AVHRR/UDM	GLC-2000	GlobCover-2009	MCD12Q1-2009
хвойные леса	1079	1953	232	356
широколиственные леса	3	170	504	22
смешанные леса	291	478	740	2401
все леса, шт.	**1377**	**2601**	**1477**	**2784**
все леса. %*	**16.01**	**30.24**	**17.17**	**32.36**
пашни, шт.	2584	3450	2491	4869
пашни, %*	30.04	40.11	28.96	56.60
населенные пункты**	–	1	2	1
Всего очагов возгорания	8602	8602	8602	8602

Примечание. * – В процентах от общего количества возгораний; ** – категория в AVHRR/UDM отсутствует.

ской, Тамбовской областей и республики Мордовия в процентах от общей площади региона по картам растительности AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover и MCD12Q1/IGBP (рис. 2). Исследована динамика изменения структуры лесов для указанных регионов (табл. 1–4). Приведена динамика изменения площадей пахотных угодий и населенных пунктов за период 2005–2009 гг. по картам растительности GlobCover (табл. 5). Определены коэффициенты корреляции между площадью для категорий карт растительности GlobCover и MCD12Q1/IGBP (рис. 3).

Предлагается в дальнейшем для оценки пожарных эмиссий использовать карты GlobCover-2009 европейского космического агентства ESA, спутник Envisat/MERIS, так как эти карты растительности оказались лучше адаптированными к растительности европейской части России.

Определено количество очагов возгорания с разбивкой по категориям лесов по данным MCD14ML (MODIS/Terra/Aqua, методика AF) и MCD45 (методика BA), с использованием карт растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009, MCD12Q1-2009 (табл. 6 и 7).

Таблица 8. Эмиссия CO (в Тг) от лесных пожаров по данным MCD14ML (MODIS/Terra и Aqua) и картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009, MCD12Q1-2009/IGBP. Регион – центральная часть Среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карты растительности							
	AVHRR/UDM		GLC-2000		GlobCover-2009		MCD12Q1-2009	
	MCD14ML							
	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra
хвойные леса	13.39	16.63	19.11	22.80	1.98	2.55	3.81	4.47
широколиственные леса	0.08	0.09	2.79	3.42	3.58	4.34	0.18	0.23
смешанные леса	4.32	5.04	6.50	7.96	7.78	9.96	25.00	30.30
Все леса	17.79	21.76	28.40	34.17	13.34	16.85	29.00	34.99

Таблица 9. Эмиссия CO (в Тг) от лесных пожаров MCD45 по картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009 и MCD12Q1-2009/IGBP. Регион – центральная часть Среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карты растительности			
	AVHRR/UDM	GLC-2000	GlobCover-2009	MCD12Q1-2009
хвойные леса	2.28	4.13	0.49	0.75
широколиственные леса	0.00	0.27	0.81	0.04
смешанные леса	0.52	0.86	1.33	4.31
Все леса	2.81	5.26	2.63	5.10

Оценена эмиссия CO от лесных пожаров по методикам AF и BA для различных карт растительности (табл. 8–9). Проведено сопоставление с результатами расчета при использовании методики FRP (табл. 10).

Показано, что методика BA (<35%) занижает количество возгораний в лесах по сравнению с количеством пожаров, определенных по методике AF (>35%), (см. табл. 6–7, строка “все леса, %”). При этом методика BA сильно завышает число возгораний на пахотных угодьях (>30%).

Показано, что методика FRP (без учета суточного хода) дает совсем низкие значения эмиссий, в 2.5 раза ниже, чем по методике BA (в 2.3 и 2.8 для Terra и Aqua соответственно).

Отметим, что величина эмиссий, полученная независимым методом (балансовая методика “top-down”) с использованием только результатов наземных и спутниковых измерений содержания CO, наиболее близка к оценке эмиссий с использованием методики AF, хотя и несколько превышает ее (см. табл. 11). В дополнение заметим, что отечественных орбитальных спектрометров, способных измерять содержания газов в тропосфере, к сожалению, еще не запущено. Опыт работы специалистов ИФА по валидации иностранных орбитальных сенсоров MOPITT, AIRS, IASI позволяет предположить, что в случае появления таких приборов и постоянной валидации их данных с помощью существующих наземных

Таблица 10. Эмиссия CO (в Тг) от лесных пожаров MCD14ML (MODIS/Terra и Aqua) по карте растительности GLC-2000. Методика расчета с использованием FRP пожаров (Wooster et al., 2005). Регион – центральная часть среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карта растительности GLC-2000	
	MCD14ML	
	Aqua	Terra
хвойные леса	0.98	1.19
широколиственные леса	0.14	0.17
смешанные леса	0.28	0.37
все леса	1.40	1.73
Все категории	1.88	2.29

Таблица 11. Эмиссия CO (в Тг) от лесных пожаров по данным MCD14ML и MCD45, усредненная по картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009 и MCD12Q1-2009/IGBP

№	Методика	Продукт MODIS	Среднее значение	Стандартное отклонение
1	Active Fires	MCD14ML	24.54	8.24
2	Burned Areas	MCD45	3.95	1.42
3	MOPITT		39.6	11.9
4	AIRS		33.7	10.1
5	IASI		35.6	10.7

Примечание. Для сравнения в 3-, 4- и 5-й строках приводятся эмиссии, полученные независимым способом с использованием данных о содержании CO орбитальных спектрометров MOPITT и AIRS и наземных спектрометров ИФА и ЗНС.

средств контроль загрязнения тропосферы может быть осуществлен с высокой точностью.

Можно утверждать, что неопределенность в оценку эмиссии окиси углерода от пожаров вносят ряд факторов. Ниже они приводятся в порядке уменьшения эффекта:

– при использовании различных методик определения площади пожаров и оценки эмиссий (AF, BA и FRP) величины эмиссий могут отличаться на порядок;

– при использовании различных карт растительности (AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover

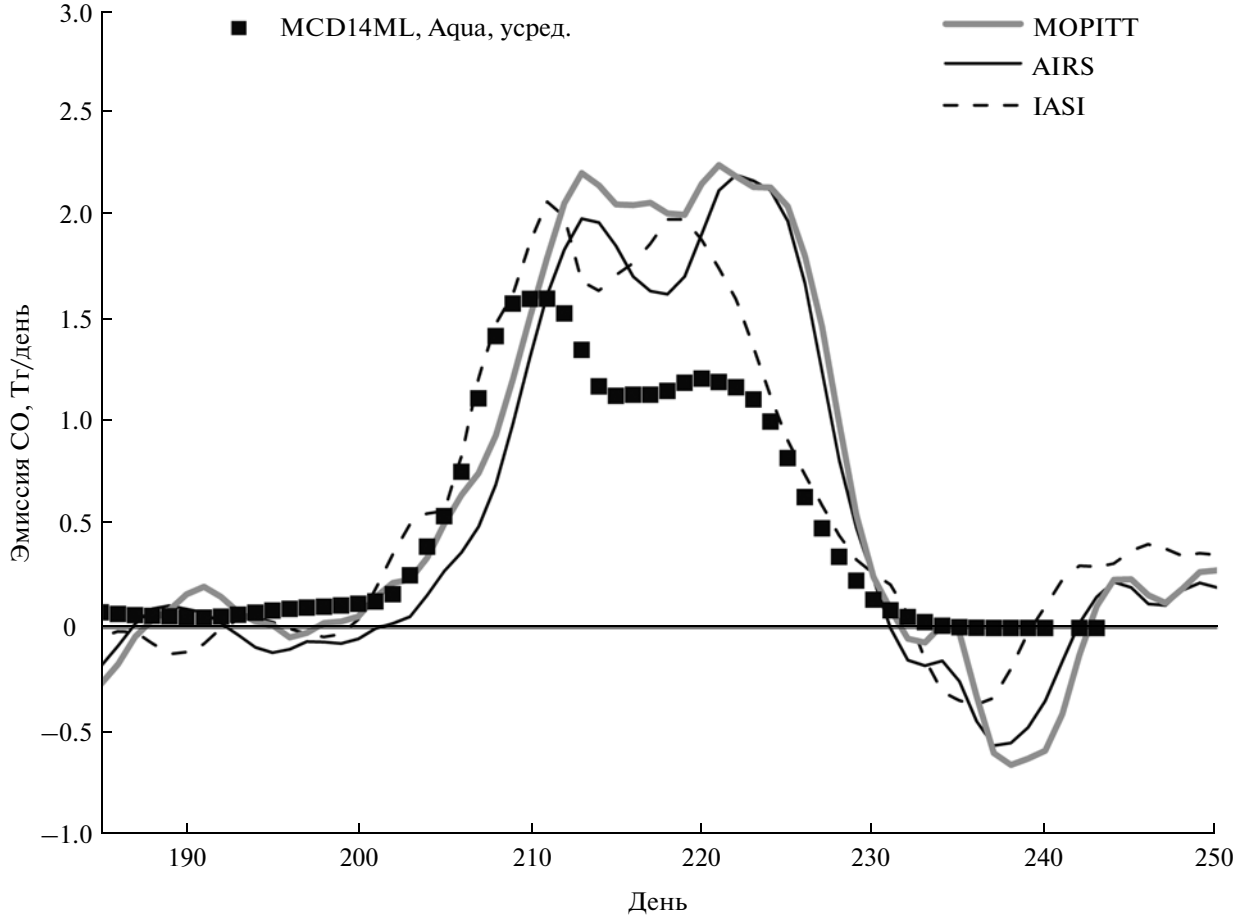


Рис. 5. Эмиссии CO над Москвой по данным спутников MOPITT, AIRS и IASI в 2010 г. Дополнительно точками отмечены усредненные за пять дней эмиссии CO, полученные по методике AF по данным MCD14ML/Aqua для карты растительности GLC-2000.

Таблица 12. Сравнение эмиссий CO по различным методикам для областей вокруг мегаполиса Москва за период 01.07.2010–01.09.2010 (в Тг) для всех категорий растительности. При расчетах использовалась карта растительности GLC-2000. Дополнительно через косую черту приведены эмиссии от растительности, произрастающей на торфяниках (поверхностные торфяные пожары)

Методика AF		
MCD14ML	Aqua	Terra
	29.29/12.13	35.32/13.57
Методика FRP		
FRP	Aqua	Terra
	1.85/0.65	2.27/0.79
GFASv1*	11.07/8.37	
maxFRP**	4.89/1.58	
Методика BA		
MCD45	5.72/1.09	
GFEDv3.1***	1.53/0.45	

Примечание. * (Kaiser et al., 2011); ** (Konovalov et al., 2011); *** (Werf et al., 2010).

и MCD12Q1/IGBP) величины эмиссий могут отличаться в 2 раза;

– при использовании данных различных спутников, на которых установлен спектрометр MODIS (Terra или Aqua), величины эмиссий могут отличаться в 1.2–1.5 раза;

– при учете динамики изменения растительного покрова ошибка составляет порядка 4–7% в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено сравнение различных карт растительности AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover и MCD12Q1/IGBP. Рекомендуется при проведении оперативных оценок эмиссий от пожаров в европейской части России использовать готовые карты растительности GLC-2000 и GlobCover-2009, так как они лучше адаптированы к типам растительности, произрастающим в европейской части России, и имеют пространственное разрешение, сопоставимое с данными сенсора MODIS.

Показано, что методика BA, основанная на продукте MCD45, не применима для оценок эмиссий от торфяных пожаров. Показано также, что из-за подземного характера горения торфа методика FRP сильно занижает значение эмиссии окиси углерода.

Проведено сопоставление рассчитанных в работе эмиссий с оценкой, полученной на основе данных спутниковых спектрометров MOPITT, AIRS, IASI и наземных спектрометров ИФА и ЗНС. Показано, что в случае торфяных пожаров 2010 г. наилучшее согласие с этой оценкой получено при использовании AF методики.

Рассчитанные эмиссии CO сопоставлялись с результатами других авторов, использующих методики GFASv1 (Kaiser et al., 2011), maxFRP (Konovalov et al., 2011), GFEDv3.1 (Werf et al., 2010). Эмиссии CO от пожаров, полученные в настоящей работе по методике AF (32.30 Тг), превышают оценки, полученные с помощью эмиссионного набора GFASv1 (11.07 Тг) в 3 раза, и в 20 раз – оценки, полученные с помощью набора GFEDv3.1 (1.53 Тг).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 10-05-00207 и № 11-05-00305).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А., Беляев А.И., Егоров В.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Коршунов Н.А., Котельников Р.В., Лупян Е.А. Валидация результатов выявления и оценки площадей, поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: Азбука-2000, 2006. Вып. 3. Т. I. С. 359–365.

Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агенства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: ДоМира, 2010. Т. 7. № 1. С. 97–105.

Бондур В.Г. Актуальность и необходимость космического мониторинга природных пожаров в России // Вестн. ОНЗ РАН. 2010. Т. 2. № Z11001. doi:10.2205/2010NZ000062.

Галеев А.А., Котельников Р.В., Крашенинникова Ю.С., Лупян Е.А., Сементин В.Л., Флитман Е.В., Щербенко Е.В. Сопоставление информации о лесных пожарах по данным спутниковых, наземных и авиационных наблюдений ИСДМ-Рослесхоз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: Азбука-2000, 2008. Вып. 5. Т. II. С. 458–468.

Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В. Сравнительный анализ результатов детектирования

пройденных огнем площадей на территории Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation и Terra-MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: Азбука-2000, 2008. Вып. 5. Т. II. С. 292–296.

Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Газовый состав приземной атмосферы в Москве в экстремальных условиях лета 2010 г. // Докл. РАН. 2011. Т. 437. № 1. С. 90–96. doi:10.1134/S0869565211070206.

Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Голицын Г.С., Грисенко А.М., Лаврова О.В., Панкратова Н.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Наблюдение состава атмосферы в московском мегаполисе с передвижной лаборатории // Докл. РАН. 2010. Т. 432. № 2. С. 250–256. doi:10.1134/S0869565210140227.

Уваров И.А., Барталев С.А, Егоров В.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Ховратович Т.С. Структура и функциональные возможности информационной системы TerraNorte для поддержки спутникового мониторинга бореальных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: Азбука-2000, 2006. Вып. 3. Т. II. С. 375–379.

Фокеева Е.В., Сафронов А.Н., Ракитин В.С., Юрганов Л.Н., Гречко Е.И., Шумский Р.А. Исследование влияния пожаров в июле-августе 2010 года на загрязнение окисью углерода атмосферы Москвы и окрестностей, оценка эмиссий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6 (в печати).

Al-Saadi, J., Soja A., Pierce R.B., Szykman J., Wiedinmyer C., Emmons L., Kondragunta S., Zhang X., Kittaka C., Schaack T., Bowman K. Evaluation of Near-Real-Time Biomass Burning Emissions Estimates Constrained by Satellite Active Fire Detections // J. Appl. Rem. Sens. 2008. V. 2. P. 1–24. doi:10.1117/1.2948785.

Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C. et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. V. 41. № I.2. P. 253–264. doi:10.1109/TGRS.2002.808356.

Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // Int. J. Rem. Sens. 2003. V. 24. № 9. P. 1977–1982.

Bartholomé E., Belward A.S. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. // Int. J. Rem. Sens. 2005. V. 6. № 9. P. 1959–1977.

Boschetti L., Roy D., Hoffmann A.A. MODIS Collection 5 Burned Area Product – MCD45. User's Guide. Version 2.0. November 2009. 30 p.

Deeter M.N., Emmons L.K, Francis G. et al. Operational carbon monoxide retrieval algorithm and selected results for the MOPITT instrument // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № D14. P. 4399. doi:10.1029/2002JD003186.

Dianov-Klokov V.I., Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V. Spectroscopic measurements of atmospheric carbon monoxide and methane. 1: Latitudinal distribution // J. Atmos. Chem. 1989. V. 8. № 2. P. 139–151.

Foody G.M. Status of land cover classification accuracy assessment // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 80. P. 185–201.

Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A.H., Woodcock C.E., Gopal S., Schneider A., Cooper A., Baccini A., Gao F., Schaaf C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 83. № 1–2. P. 287–302.

Fritz F., McCallum I., Schill C., Perger C., Grillmayer R., Achard F., Kraxner F., Obersteiner M. Geo- Wiki.Org: The Use of Crowdsourcing to Improve Global Land Cover // Rem. Sens. Environ. 2009. V. 1. P. 345–354. doi:10.3390/rs1030345.

Giglio L. MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide Version 2.4 // Science Systems and Applications Inc. Univ. Maryland. Dep. Geography. 18 February 2010. 60 p.

Giglio L., Csiszar I., Justice C.O. Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua MODIS sensors // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № G02016. doi:10.1029/2005JG000142.

Giri C., Zhu Z., Reed B. A comparative analysis of the Global Land Cover 2000 and MODIS land cover data sets // Rem. Sens. Environ. 2005. V. 94. P. 123–132. doi:10.1016/j.rse.2004.09.005.

Global Land Cover 2000 database. European Commission, Joint Research Centre, 2003, http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php.

Guenther A., Karl T., Harley P., Wiedinmyer C., Palmer P.I., Geron C. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. P. 3181–3210.

Hansen M., DeFries R., Townshend J.R.G., Sohlberg R. Global land cover classification at 1 km resolution using a decision tree classifier // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. № 6–7. P. 1331–1364.

Hansen M.C., Reed B. A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1km global land cover products // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. № 6–7. P. 1365–1374.

Hebert Ph., Blumstein D., Buil C., Carlier T., Chalon G., Astruc P., Clauss A., Sim'eoni D., Tournier B. IASI instrument: technical description and measured performances // Proc. 5th Int. Conf. Space Optics (ICSO 2004). 30 March–2 April 2004. Toulouse, France. ESA SP-554. Noordwijk, Netherlands: ESA Publ. Div., 2004. P. 49–56.

Iwao K., Nishida K., Kinoshita T., Yamagata Y. Validating land cover maps with degree confluence project informa-

tion // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. № L23404. doi:10.1029/2006GL027768.

Iwao K., Nasahara K.N., Kinoshita T., Yamagata Y., Patton D., Tsuchida S. Creation of new global land cover map with map integration // J. Geogr. Inf. Sys. 2011. V. 3. P. 160–165. doi:10.4236/jgis.2011.32013.

Jung M., Henkel K., Herold M., Churkina G. Exploiting synergies of global land cover products for carbon cycle modeling // Rem. Sens. Environ. 2006. V. 101. P. 543–553. doi:10.1016/j.rse.2006.01.020.

Justice C.O, Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J.T., Roy D., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F., Kaufman Y. The MODIS fire products // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 83. P. 244–262.

Kaiser J.W., Heil A., Andreae M.O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.J., Razinger M., Schultz M.G., Suttie M., van der Werf G.R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power //Biogeosci. Discuss. 2011. V. 8. № HH.7339–7398. doi:10.5194/bgd-8-7339-2011.

Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N., Yurova A., Zvyagintsev A.M. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of the extreme air pollution episode in the Moscow megacity region // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2011. V. 11. P. 12141–12205. doi:10.5194/acpd-11-12141-2011.

Loveland T.R., Reed B.C., Brown J.F., Ohlen D.O., Zhu Z., Yang L., Merchant J. Development of a global landcover characteristics database and IGBP DISCover from 1km AVHRR data // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. P. 1301–1330.

Loveland T.R., Zhu Z., Ohlen D.O., Brown J.F., Reed B.C., Yang, L. An analysis of the IGBP Global Land-Cover Characterization Process // Photogram. Engin. Rem. Sens. 1999. V. 65. P. 1021–10320.

Mayaux P., Eva H., Gallego J., Strahler A.H., Herold M., Agrawal S., Naumov S., De Miranda E.E., Di Bella C.M., Ordoyne C., Kopin Y., Roy P. Validation of the Global Land Cover 2000 Map // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2006. V. 44. № 7. P. 1728–1739. doi:10.1109/TGRS.2006.864370.

McCallum I., Obersteiner M., Nilsson S., Shivdenko A. A spatial comparison of four satellite derived 1 km global land cover datasets // Appl. Earth Observ. Geoinf. 2006. V. 8. № 4. P. 246–255. doi:10.1016/j.jag.2005.12.002.

Poupkou A., Giannaros T., Markakis K., Kioutsioukis I., Curci G., Melas D., Zerefos C. A model for European Biogenic Volatile Organic Compound emissions: Software development and first validation // Environ. Modell. Soft. 2010. V. 25. P. 1845–1856. doi:10.1016/j.envsoft.2010.05.004.

Roy D.P., Boschetti L., Justice C.O., Ju J. The Collection 5 MODIS Burned Area Product – global evaluation by comparison with the MODIS Active Fire Product // Rem. Sens. Environ. 2008. V. 112. P. 3690–3707.

*See L.M., Fritz S.*A Method to compare and improve land cover datasets: Application to the GLC-2000 and MODIS Land Cover Products // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. V. 44. № 7. P. 1740–1746. 10.1109/TGRS.2006.874750.

Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 2nd ed. 1225 p.

Stolbovoi V., Savin. I. Maps of soil characteristics // Land resources of Russia / Eds.: Stolbovoi V., McCallum I. Luxenburg, Austria: Int. Inst. Appl. Sys. Analys. and RAS, 2002. CD-ROM. Distr. NSIDC/WDCG, Boulder.

Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A, Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // Rem. Sens. Environ. 2004. V. 93. P. 546–564. doi:10.1016/j.rse.2004.08.011.

van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R.S., Jin Y., van Leeuwen T.T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P.11707–11735. doi:10.5194/acp-10-11707-2010.

Wiedinmyer C., Quayle B., Geron C., Belote A., McKenzie D., Zhang X., O'Neill S., Wynne K.K. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling // Atm. Environ. 2006. V. 40. P. 3419–3432.

Witte J.C., Douglass A.R., da Silva A., Torres O., Levy R.C., Duncan B.N. NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2011. V. 11. P. 19113–19142. doi:10.5194/acpd-11-19113-2011.

Wooster M.J., Roberts G., Perry G.L.W., Kaufman Y.J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № D24311. doi:10.1029/2005JD006318.

Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V. Long-term measurements of carbon monoxide over Russia using a spectrometer of medium resolution // Recent Res. Devel. Geophys. 2002. V. 4. P. 249–265.

Yurganov L., McMillan W., Grechko E., Dzhola A. Analysis of global and regional CO burdens measured from space between 2000 and 2009 and validated by ground-based solar tracking spectrometers // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 3479–3494. doi:10.5194/acp-10-3479-2010.

Yurganov L., Rakitin V., Dzhola A., August T., Fokeeva E., George M., Gorchakov G., Grechko E., Hannon S., Karpov A., Ott L., Semutnikova E., Shumsky R., Strow L. Satellite- and ground-based CO total column observations over 2010 Russian fires: accuracy of top-down estimates based on thermal IR satellite data // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 7925–7942. doi:10.5194/acp-11-7925-2011.

Carbon Monoxide Emissions in Summer 2010 in the Central Part of Russian Plain and Estimation of their Uncertainties with Different Land Cover Maps Using

A. N. Safronov[1], E. V. Fokeeva[1], V. S. Rakitin[1], L. N. Yurganov[2], E. I. Grechko[1]

[1] *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[2] *Joint Center for Earth System Technology, University of Maryland Baltimore, USA*

Carbon monoxide emission estimation of wildfires during anomaly hot summer 2010 in the central part of Russian plain was the goal of our study. The comparison of different vegetation maps and investigation of forest structure dynamics for 2005–2009 periods have been carried out. The "Active Fires" (product MODIS – MCD14ML) and "Burned Areas" (product MODIS – MCD45) methods with AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover and MCD12Q1 vegetation maps have been used to obtain CO emission from forest wildfires. It is shown that the major uncertainties of an estimation emission of CO in descending order are: the distinctions in emission calculation methods, the differences in vegetation maps used the differences of the satellites data from Terra and Aqua, and the insufficient registration of forest structure dynamics. In addition and to compare we bring the emission estimations obtained by independent method with using of orbital (MOPITT, AIRS, IASI) and ground based (Moscow, Zvenigorod) spectroscopic measurements of CO total content.

Keywords: forest and peat wildfire, carbon monoxide, vegetation maps, satellite measurements, spectroscopic measurements, pollution transport modeling, estimation of emissions, central part of Russian plain

Issled.zemli N4-ver_Safronov.indd 1

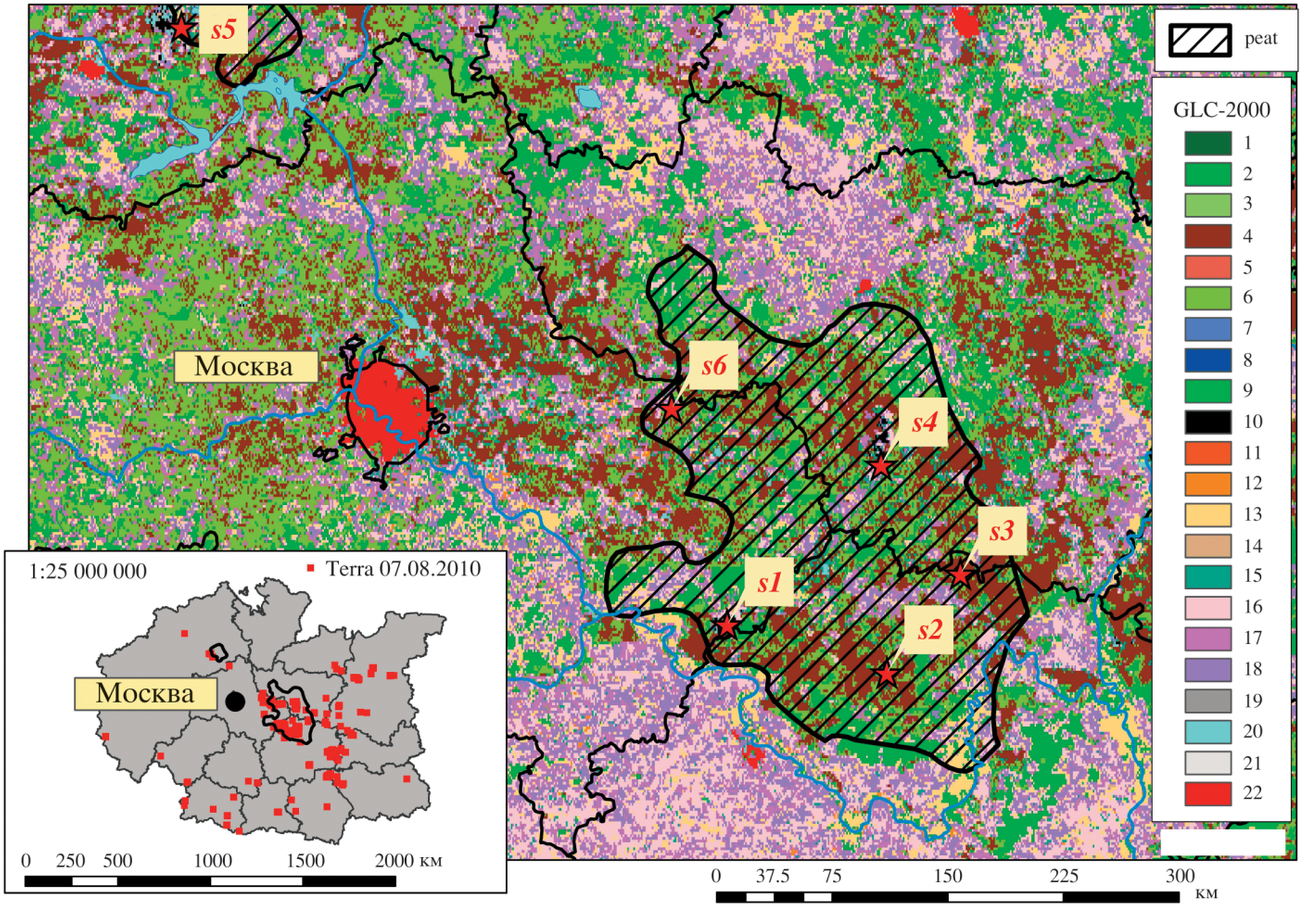


Рис. 1. Карта растительности GLC-2000 (SPOT-4/VGN) Global v1.1 вблизи мегаполиса Москва с отмеченными на ней торфяниками: *s*1-*s*6 – основные очаги (подземных) торфяных пожаров, дополнительно отмечены крупные водохранилища и реки; на вкладке – исследуемый домен и очаги пожаров по данным MODIS/Terra на 07.08.2010 г.

7/17/12 8:25:15 AM

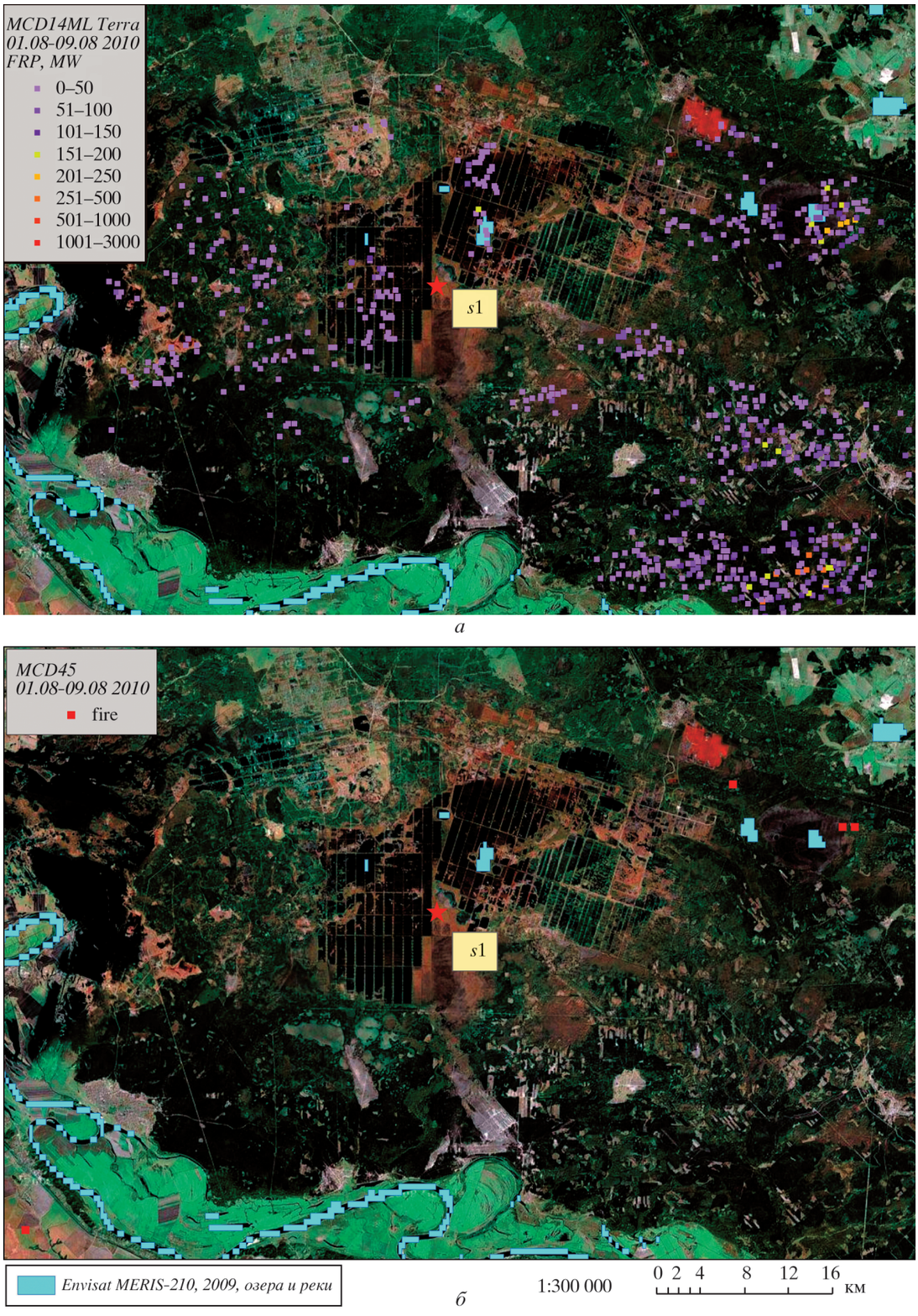


Рис. 4. Детализация торфяника, расположенного вблизи модельного источника *s*1, на космическом снимке в GoogleEarth: темные квадраты – участки добычи торфа; голубой цвет между квадратами – дренажная система (дополнительно отложена водная гладь по Envisat/MERIS-210, 2009 г.). На части рисунка *а* – дополнительным слоем нанесены очаги пожаров (в виде точек), градуированные по величине FRP, по данным спутника MODIS/Terra (MCD14ML, методика AF, 01.08-09.08 2010 г.); на части *б* – очаги пожаров (в виде красных точек), по данным спутника MODIS/Terra/Aqua (MCD45, методика BA, 01.08-09.08 2010 г.).

Issled.zemli N4-ver_Safronov.indd 2 7/17/12 8:25:18 AM

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 47–56

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ПОИСК ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЦ KATRINA ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2012 г. Д. М. Ермаков[1, 2]*, А. П. Чернушич[1], Е. А. Шарков[2], И. В. Покровская[2]

[1]Фрязинский филиал Учреждения Российской академии наук Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московской обл.

[2]Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

**E-mail: dima@ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 07.11.2011 г.

В настоящей работе рассмотрена возможность применения специализированного подхода для пространственно-временной интерполяции спутниковых данных, учитывающих кинематику многомасштабных процессов при решении задач дистанционного зондирования (ДЗ) быстро протекающих процессов в земной атмосфере. Подход заимствован из интенсивно развивающихся дисциплин технического зрения и компрессии видеоданных. Основными достоинствами обсуждаемого метода являются его замкнутость относительно входных (интерполируемых) спутниковых данных, способность оценивать и учитывать кинематику многомасштабных процессов, сравнительно низкая вычислительная стоимость и простота программно-алгоритмической реализации. На основе разработанного программно-алгоритмического подхода решена задача о "мгновенном" источнике скрытой энергии при интенсификации тропического циклона (ТЦ) Katrina по данным спутниковых радиометров SSM/I миссии DMSP.

Ключевые слова: тропический циклон, интегральное поле водяного пара, критические параметры генезиса; интенсификация

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковое дистанционное зондирование (ДЗ) является в настоящее время уникальным средством получения оперативной глобальной информации о климатических процессах на Земле и, в частности, о режиме и текущем состоянии глобального тропического циклогенеза (ГТЦ). Однако, несмотря на несомненный прогресс в исследовании ГТЦ (Sharkov, 2000; 2011), показано, что с точки зрения требований, предъявляемых актуальными задачами к детальности и полноте входных данных, спутниковая информация носит в определенной степени фрагментарный характер. Так, отдельному прибору, размещенному на спутнике с солнечно-синхронной орбитой, как правило, требуется несколько суток для полного покрытия Земли измерениями. При этом если задача касается "стационарных" объектов на земной поверхности (например, растительность), то принципиальных проблем для формирования двумерного поля измеряемого параметра практически не возникает. Однако для изучения быстропеременных процессов (например, генезис тропического циклона (ТЦ) или его интенсификация) ситуация принципиально иная. Наблюдательный интервал должен быть существенно сокращен за счет одновременной работы нескольких идентичных приборов на серии спутников, как, например, в случае спутниковых радиометров SSM/I (Ермаков и др., 2007), используемых для восстановления глобальных полей приповерхностного ветра, концентрации водяного пара и других метеорологических параметров. Для анализа механизмов формирования ТЦ или поиска источников и механизмов его интенсификации требуются измерения с частотой несколько (4–8) раз в сутки (Ермаков и др., 2011), и при этом должно обеспечиваться полное покрытие экваториального пояса Земли или, по крайней мере, циклоногенерирующих акваторий Мирового океана. Указанные требования к такой системе наблюдения и мониторинга (высокая частота обзора и полнота пространственного покрытия) плохо совместимы, но необходимость их реализации является принципиальной для задач поиска практически "мгновенных" механизмов и источников энергии для интенсификации атмосферных катастроф. В качестве примера можем указать на печально известный (и много обсуждаемый в научной прессе США и в средствах массовой информации) пример с неожиданной интенсификацией тропического возмущения в стадию тайфуна (ТЦ Katrina) в акватории Мексиканского залива и последующим выходом его на г. Новый Орлеан с катастро-

фическими последствиями. Эта уникальная ситуация (своего рода "загадка" ТЦ Katrina) американскими специалистами уже неоднократно анализировалась с позиций парадигмы стандартной "термо-конвекционной гипотезы", однако без достижения корректно интерпретируемых физических результатов (Шарков, 2010).

Более того, детальный анализ эволюционных характеристик ГТЦ за двадцатилетний период (Покровская, Шарков, 2006) показывает, что указанный пример отнюдь не является исключительным (как пишет об этом американская пресса), а, наоборот, представляет собой достаточно регулярную картину в эволюции ТЦ.

Цель настоящей работы заключается в применении специализированного подхода для пространственно-временной интерполяции спутниковых данных, учитывающих кинематику многомасштабных процессов при решении задач ДЗ быстро протекающих процессов в земной атмосфере. Подход заимствован из интенсивно развивающихся дисциплин технического зрения и компрессии видеоданных. На основе разработанного програмно-алгоритмического подхода решена задача о "мгновенном" источнике скрытой энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования комплекса SSM/I миссии DMSP (NASA).

ПРОБЛЕМЫ УСВОЕНИЯ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Поскольку целый ряд глобальных процессов в атмосфере Земли носят в основном характер плавных, относительно медленных изменений, то имеется потенциальная возможность выполнять их качественный анализ и оценку ряда характеристических параметров на основе "достроенных", т.е. интерполированных по времени и/или в пространстве спутниковых данных, закрывающих "пробелы" в реальных наблюдениях.

В настоящий момент известно два принципиальных подхода к подобному "достраиванию" спутниковых данных. Физически более обоснованным представляется подход, называемый ассимиляцией (или усвоением) данных. В нем промежуточные между измерениями (по времени и/или в пространстве) состояния исследуемой среды рассчитываются как решения системы уравнений, моделирующих физические процессы в этой среде. Данные измерений используются в качестве граничных условий и для уточнения (регуляризации) модельных прогнозов. В зависимости от специфики задачи может применяться модель глобальной циркуляции океана, атмосферы или общей циркуляции, см., например, (Гусев, 2011; Мингалев и др., 2011). К сожалению, несмотря на существенный прогресс в моделировании глобальной циркуляции в океане и атмосфере, вызванный как совершенствованием математического аппарата, так и увеличением быстродействия вычислительных средств, задачу построения универсальной циркуляционной модели системы океан–атмосфера Земли нельзя считать удовлетворительно решенной. Предложен ряд конкурирующих схем, отличающихся способами описания физических процессов и, в частности, способами введения трехмерной системы координат и выбора узловых точек; каждая из них имеет свои достоинства и недостатки, что привело к возникновению "гибридных" моделей, реализующих "переключение" между базовыми схемами в зависимости от результатов текущих расчетов (например, (Bleck, 2002)). Вопрос сравнительного анализа существующих моделей глобальной циркуляции выходит далеко за рамки настоящей работы.

Другой существенной трудностью при реализации ассимиляционного подхода является то, что система модельных уравнений, как правило, содержит неизвестные или известные с низкой точностью параметры, а граничные условия (опорные измерения) сильно зашумлены. При решении таких систем используют сложные оптимизирующие подходы, в частности, основанные на фильтрации Калмана (Kalman, 1960; Rozier et al., 2007). Такие подходы, применяемые для решения систем глобальной циркуляции, в дополнение к указанным выше трудностям сложны в программной реализации и часто предъявляют экстремально высокие требования к ресурсам вычислительной техники (Rozier et at., 2007).

Собственно интерполяционный (в узком смысле) подход во многом лишен указанных выше трудностей, т.е. замкнут относительно входных спутниковых данных и может быть основан на простых вычислительных схемах. Однако "достраивание" данных в отсутствие физически обоснованной модели осуществляется по более формальным математическим критериям, которые выбираются, как правило, из соображений гладкости или непрерывности получаемых решений и слабо обусловлены природой наблюдаемых процессов. Одним из ранних и широко применяемых до сих пор приемов является метод "оптимальной" интерполяции (Гандин, Каган, 1976), реализующий, по сути, линейную интерполяцию в локальной окрестности точек измерения. Такой подход вполне адекватен и эффективен при исследовании изменяющихся, но не перемещающихся по поверхности Земли объектов (например, зон строительства или иного антропогенного воздействия на малые экосистемы), либо при исследовании усредненных по значительным

промежуткам времени величин (например, полей среднемесячных температур поверхности океана). Ясно, однако, что "оптимальная" интерполяция, как и ее нелинейные локальные аналоги (сплайн-интерполяция и др.), не способна адекватно описать кратковременное возмущающее воздействие на локальные области более масштабных динамических процессов (прохождение атмосферных фронтов, ядер циклонов, распространение аэрозольных примесей и т.д.). Информация о таких событиях будет частично или полностью потеряна при локальной интерполяции, если эти события не регистрируются над изучаемой областью в соответствующий момент времени.

В настоящей работе рассмотрена возможность применения альтернативного подхода для пространственно-временной интерполяции спутниковых данных, учитывающего кинематику многомасштабных процессов. Сам подход не является новым, но к настоящему моменту не имеет широкого распространения при решении задач ДЗ и заимствован из интенсивно развивающихся дисциплин технического зрения и компрессии видеоданных. Основными достоинствами обсуждаемого метода являются его замкнутость относительно входных (интерполируемых) спутниковых данных, способность оценивать и учитывать кинематику многомасштабных процессов, сравнительно низкая вычислительная стоимость и простота программно-алгоритмической реализации (по сравнению с фильтрацией Калмана). В работе предложены некоторые модификации исходного метода, а также отмечены возможности привлечения дополнительной информации с целью "регуляризации" получаемых решений.

ОСНОВЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДВУМЕРНЫХ ПОЛЕЙ ДАННЫХ

В задачах технического зрения и обработки видеоданных входную информацию принято представлять в виде последовательности растровых изображений фиксированных размеров, получаемых, как правило, через равные промежутки времени. Каждое такое изображение называется видеокадром или, коротко, кадром, а число кадров, получаемых в единицу времени, – кадровой частотой. Иногда возникает потребность рассматривать некоторые кадры (или их фрагменты) не как независимые, а как связанные с другими кадрами определенным преобразованием, иными словами, представить часть информации не исходными растровыми изображениями, а ссылками на опорные кадры и на соответствующую функцию преобразования.

Разновидность такого представления обеспечивает эффективную компрессию видеоданных в семействе алгоритмов MPEG (Gall, 1991). Возможность его построения обусловлена тем, что интервалы времени между последовательными кадрами в основном значительно меньше характерных масштабов временной корреляции регистрируемых процессов, т.е. наблюдаемые объекты медленно меняют положение, форму, размер и т.д. при переходе от кадра к кадру.

Построение осуществляется с помощью приема, называемого "оценкой движения". Опорный кадр разбивается на N блоков – небольших квадратных фрагментов равных размеров W на W пикселов, так, чтобы каждый пиксел кадра содержался хотя бы в одном из блоков. Положение i-го блока однозначно определяется парой чисел (x_i, y_i), задающих расстояние от левого верхнего угла кадра до центра блока в пикселах по горизонтали и вертикали соответственно. Для каждого блока опорного кадра осуществляется поиск "похожего", т.е. наиболее близкого по некоторой заданной метрике, фрагмента на другом (например, следующем) кадре. Для i-го блока поиск осуществляется в окрестности положения (x_i, y_i), например, в квадрате размером $3W$ на $3W$ и с центром в (x_i, y_i). Если наиболее похожий блок найден в положении (x_i', y_i'), то i-му блоку опорного кадра ставится в соответствие вектор смещения $m_i = (x_i' - x_i, y_i' - y_i)$. В результате применения этой процедуры ко всем блокам опорного кадра формируется поле векторов M, связывающее попарно блоки опорного кадра с похожими и близкими по положению фрагментами другого кадра.

Подобный прием (как составная часть алгоритма) достаточно эффективен при компрессии видеоданных. Однако можно видеть, что векторы смещений, формирующие поле M, не всегда имеют смысл перемещения объектов в пространстве кадра. Действительно, близость пары блоков по заданной метрике не означает тождественность наблюдаемых объектов, особенно если найденное наилучшее соответствие не является "достаточно" хорошим. Кроме того, может возникнуть проблема выбора ложной цели из равноправных (по критерию близости) альтернатив. Алгоритм оценки движения должен удовлетворять требованиям непрерывности получаемого поля смещений и устойчивости к взаимным смещениям (или деформациям) объектов разных масштабов. С этой целью процедура оценки строится иерархически. Сначала проводится анализ для больших блоков, дающий грубую оценку поля на наиболее крупных масштабах, затем размеры блоков и областей поиска последовательно уменьшаются (причем центры областей поиска смещаются в соответ-

ствии с ранее полученными оценками векторов смещений), обеспечивая все более детальное приближение при сохранении непрерывности M.

С той же целью получения более подробного и точного представления о поле M применяют еще ряд приемов. Так, располагают блоки опорного кадра не "в стык" (чтобы каждый пиксел кадра принадлежал ровно одному блоку), а с наложением друг на друга, сокращая расстояния между центрами блоков вплоть до одного пиксела по каждому направлению. Длины векторов смещений рассчитывают с субпиксельной точностью, предварительно проведя простейшую (например, билинейную) интерполяцию сравниваемых кадров. Если имеется априорная информация об анизотропности объектов или преимущественном направлении их перемещения, блоки и/или области поиска преобразовывают из квадратных в прямоугольные.

Считая, что поле M адекватно описывает перемещения объектов (элементов изображения) за известный интервал времени между парой обработанных кадров, легко вычислить (в линейном приближении) поле скоростей наблюдаемых объектов и оценить их положения в промежуточные моменты времени, т.е. фактически провести временную интерполяцию видеоданных. Такую процедуру иногда называют "компенсацией движения". Для этого необходимо реализовать операцию действия заданного поля смещений (поля M, помноженного на коэффициент в диапазоне от 0 до 1) на опорный кадр, результатом которой является новый кадр (того же размера, что и опорный) с соответственно смещенными элементами (блоками). Одной из сложностей этой операции является то, блоки опорного кадра после смещения не обязательно будут покрывать всю область нового кадра. Для устранения пропусков доопределяют поле смещения по непрерывности: оценивается средний вектор смещения для блоков, покрывающих окрестность пропуска данных, и находится (или интерполируется) область опорного кадра, которая в результате такого смещения закроет этот пропуск. Наиболее остро эта проблема встает на краях изображения – областях около границ, по одну сторону которых отсутствуют видеоданные. В этом случае описанный выше прием закрытия пропусков может не оправдать себя, и временную интерполяцию таких областей приходится проводить более примитивными средствами, например, методом локальной "оптимальной" интерполяции по времени обрабатываемой пары кадров.

Поскольку за интервал времени между парой интерполируемых кадров наблюдаемые объекты и их части могут не только смещаться, но и менять свои свойства (яркость, относительный контраст), то для повышения точности процедуру компенсации движения часто реализуют симметрично относительно обоих кадров. При этом на более ранний по времени кадр действуют полем, пропорциональным M, а на более поздний – противоположно направленным полем, пропорциональным $-M$ (коэффициенты пропорциональности выбираются в соответствии с интерполируемым моментом времени); результаты двух действий объединяют.

В совокупности приемы оценки и компенсации смещений обеспечивают возможность временной интерполяции видеоданных с учетом динамики многомасштабных процессов. При этом, как видно, существует множество вариантов реализации и настройки такой интерполяции (от назначения размеров и положений блоков до организации иерархической схемы оценки смещений). Построение конкретной реализации, наиболее адекватной цели исследования, является задачей исследователя. Кроме того, классическая схема интерполяции, описанная выше, является линейной по времени. Обоснованное введение нелинейности требует модификации алгоритма. Одной из наиболее существенных проблем описанной схемы являются пропуски (отсутствие) части данных. Регулярно возникает нехватка данных при работе на краях кадра, если в соответствии с принципом непрерывности поля смещений требуется "выйти" за границы изображения. Аналогичная проблема может возникнуть и во внутренних областях кадра, в частности, из-за дефектов или пропусков данных, связанных со сбоями или повышенными шумами при формировании изображения, а также с эффектом "взаимного перекрытия", связанного с тем, что реальное движение осуществляется в трехмерном пространстве. Хотя формально видеоданные в "проблемных" областях могут присутствовать, их распространение на интерполированные кадры является неоправданным и часто приводит к общему снижению качества интерполяции.

В настоящей работе рассмотрена возможность временной интерполяции данных многоканальных радиометров SSM/I, расположенных на спутниках серии DMSP (http://dmsp.ngdc.noaa.gov/dmsp.html). Приборы SSM/I осуществляют измерения радиояркостных температур в семи каналах, различающихся длиной волны и/или поляризацией сигнала. С формальной точки зрения интерполяцию можно выполнить для каждого из каналов измерений независимо. Однако более обоснованным представляется подход, при котором по исходным данным сначала восстанавливается некоторый физический параметр системы океан-атмосфера, а затем проводится интерполяция расчетных полей этой величины. В этом

случае можно использовать априорные сведения о характерных масштабах корреляции процессов, приводящих к изменениям интерполируемых данных, и применить эту информацию для настройки и отладки алгоритма интерполяции.

С точки зрения алгоритма интерполяции кадры видеоданных являются двумерными массивами яркостей точек, образующих регулярную сетку (растр). Спутниковые данные также являются двумерным массивом некоторой величины, например, восстановленного поля атмосферного водяного пара *W*. Однако исходная сетка измерений (формат данных SWATH) в координатах широт и долгот является нерегулярной и криволинейной, что затрудняет применение стандартных приемов обработки. Поэтому в настоящей работе использованы данные, приведенные к регулярной географической сетке с шагом 0.5° (формат GRID). Таким образом, глобальное распределение водяного пара в атмосфере Земли представлено эквивалентным растровым изображением размерами 720 точек по ширине (долготе) на 360 точек по высоте (широте).

Частота пролета спутника серии DMSP над одним и тем же местом земной поверхности составляет примерно один раз в сутки, поэтому в качестве отправной точки при формировании “кадров” водяного пара имеет смысл взять спутниковые данные, накопленные за одни сутки наблюдений. Эти кадры содержат характерные пропуски данных, “пространственные лакуны”, вызванные тем, что соседние витки орбиты спутника разнесены на расстояние примерно вдвое большее ширины обзора SSM/I на экваторе (рис. 1). Как отмечалось, наличие таких пропусков существенно сказывается на качестве интерполяции, кроме того, эти пропуски не занимают постоянного места на кадре, а медленно смещаются в долготном направлении (примерно на треть ширины) каждые сутки. В связи с этим возникает необходимость привлечения большего объема спутниковых данных для формирования кадра без лакун.

Необходимо рассмотреть две принципиальные возможности. Первая состоит в формировании “однородного” кадра – по данным одного спутникового прибора. К сожалению, в этом случае на формирование кадра без лакун требуются наблюдения в интервале трех суток, который сопоставим со временем жизни ряда важных мезомасштабных атмосферных процессов (см., например, (Sharkov, 2011). Остается вторая возможность, состоящая в сохранении суточного интервала между кадрами за счет использования данных нескольких приборов SMM/I, работающих одновременно. Так, в 2005 г. одновременно производились наблюдения со спутников F13, F14 и F15 серии DMSP. Объединение данных со всех трех спутников позволило сформировать “композитные” кадры без пространственных лакун за каждые сутки наблюдений. Пример композитного кадра за 26.08.2005 приведен на рис. 2 (на вклейках с цветн. рис.).

Существенным недостатком композитных кадров является их неоднородность. Один из аспектов этой неоднородности – качество информации, поступающей от разных приборов. В данном случае этой неоднородностью пренебрегали в связи с высокой долговременной стабильностью приборов SSM/I. Другой аспект неоднородности – пространственно-временной. Точки, близко расположенные на композитном кадре, но соответствующие измерениям с разных спутников, отражают состояние атмосферы в моменты времени, отстоящие друг от друга на несколько часов. В результате изучаемые гладкие процессы могут претерпевать резкие пространственно-временные разрывы на композитных кадрах. При интерполяции в первом приближении такие разрывы игнорируются, затем предпринимается попытка частичной компенсации этих разрывов за счет “сдвигов” отдельных областей кадров по времени. Обсуждаются и другие возможности уменьшения эффекта неоднородности композитных кадров.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

В работе использована информация баз данных GLOBAL-TC и GLOBAL-FIELDS (ИКИ РАН) с элементами тематической обработки. Первая представляет собой хранилище систематизированных данных ДЗ о глобальном тропическом циклогенезе, т.е. содержит информацию о физическом процессе, рассматриваемом на всех акваториях Мирового океана (Покровская, Шарков, 2006). Информация в ней была систематизирована по отдельным регионам, в каждом из которых проведены временная и пространственная привязки, были проверены правильность и полнота сообщений, связанных с характерными климатическими особенностями каждого региона, проведен препроцессинг поступающей сырой информации. Каждый вновь образующийся ТЦ или тропическое возмущение, в дальнейшем не перешедшее в развитую форму ТЦ, составляет в базе данных отдельный файл информации. Таблица для ТЦ Katrina сформирована на основе базы данных GLOBAL-TC за 2005 г. ТЦ Katrina зародился 23 августа 2005 г. в районе Багамских островов и представлял собой размытую облачную систему с отдельными плотными кластерами мощно-кучевых облаков, скорость ветра была 5–10 м/с, давление на уровне моря составляло 1008 мб. В

Эволюция ТЦ Katrina (2005)

Номер ТЦ = ATL 0511			Имя ТЦ = KATRINA					Всего точек = 38	
№	Стадия развития возмущения, *	Дата, ММ_ДД	Время, UT	Широта, град	Долгота, град	Давление, мбар	Скорость ветра в центре возмущения, м/с	Направление смещения возмущения, румбы	Скорость смещения, узлы, **
1	TL	08_23	9	25.0	–73.0	1008	5	W	10
2	TL	08_23	15	25.0	–74.0	1009	11	E	10
3	TD	08_23	21	23.2	–75.5	1007	15	SW	12
4	TD	08_24	3	23.4	–76.0	1007	15	WNW	6
5	TD	08_24	9	24.0	–76.4	1006	15	NW	6
6	TS	08_24	15	24.7	–76.7	1006	18	NNW	7
7	TS	08_24	21	25.6	–77.2	1002	21	NW	8
8	TS	08_25	3	26.0	–78.0	1001	23	WNW	7
9	TS	08_25	9	26.2	–78.7	1000	23	W	7
10	STS	08_25	15	26.2	–79.3	997	26	W	5
11	T	08_25	21	26.1	–79.9	985	33	W	5
12	T	08_26	3	25.5	–80.7	984	33	SW	7
13	T	08_26	9	25.3	–81.5	987	33	W	4
14	T	08_26	15	25.1	–82.2	981	33	W	6
15	T	08_26	16	25.1	–82.2	971	44	0	0
16	T	08_26	21	24.8	–82.9	965	44	WSW	7
17	T	08_27	3	24.6	–83.6	965	46	WSW	7
18	T	08_27	9	24.4	–84.4	945	51	WSW	6
19	T	08_27	15	24.5	–85.0	940	51	S	6
20	T	08_27	21	24.6	–85.6	945	51	S	6
21	T	08_28	3	25.0	–86.2	939	51	WNW	6
22	T	08_28	6	25.1	–86.8	935	65	WNW	7
23	T	08_28	9	25.4	–87.4	935	65	WNW	9
24	T	08_28	12	25.7	–87.7	908	73	WNW	10
25	T	08_28	15	26.0	–88.1	907	78	WNW	10
26	T	08_28	21	26.9	–89.0	902	76	NW	11
27	T	08_29	3	27.6	–89.4	904	73	NNW	9
28	T	08_29	9	28.8	–89.6	915	69	N	13
29	T	08_29	15	30.2	–89.6	927	57	N	14
30	T	08_29	21	31.9	–89.6	960	33	N	16
31	STS	08_30	3	33.5	–88.5	973	26	NNE	10
32	TS	08_30	9	34.7	–88.4	981	23	N	16
33	TD	08_30	15	36.3	–87.5	985	15	NNE	18
34	TL	08_31	10	40.0	–71.0	991	13	ENE	25
35	L	08_31	20	42.2	–75.4	997	11	ENE	35
36	L	09_01	4	47.0	–72.0	991	11	NNE	20
37	L	09_02	4	54.0	–69.0	985	11	NNE	20
38	L	09_03	4	57.0	–63.0	986	7	ENE	20

* Стадии развития возмущения (по классификации (Покровская, Шарков, 2006)): TL – первичное тропическое возмущение (замкнутая область низкого приземного давления тропической зоны); TD – тропическая депрессия; TS – тропический шторм; STS – сильный тропический шторм; T – тайфун (ураган), L – область низкого приземного давления умеренных широт.

** 1 узел = 0.51 м/с = 1.85 км/ч.

течение 23–25 августа возмущение быстро усиливалось, смещаясь вдоль территории Багамских островов, и, подойдя к побережью Флориды, достигло силы урагана, давление в центре упало до 985 мб, скорость ветра возросла до 33 м/с. Пройдя над территорией Флориды, ураган сместился на акваторию Мексиканского залива, произошли опять очень быстрое усиление скорости ветра и резкое падение приземного давления. Максимальной стадии развития ураган достиг на траверсе Нового Орлеана, давление упало до 902 мб, скорость ветра возросла до 76–78 м/с (пятая – наивысшая – категория шкалы Саффир–Симпсон), размер облачного диска составлял 435 миль в диаметре. Сменив направление смещения с запад-северо-западного на северное, 29 августа ураган достиг побережья США (г. Новый Орлеан), прошел над его территорией и к началу сентября достиг территории п-ова Лабрадор, где и разрушился. Материальный ущерб от урагана составил (по предварительным оценкам) 89.6 млрд долларов США.

База данных GLOBAL-FIELDS содержит информацию о глобальных полях радиояркостных температур (Ермаков и др., 2007), полученных с помощью микроволнового комплекса SSM/I – семиканального радиотеплового прибора, принимающего линейно поляризованное излучение на частотах 19.35, 22.235, 37.0, и 85.5ГГц. На всех частотах, кроме 22.235 ГГц, измеряется как вертикально, так и горизонтально поляризованное излучение. На 22.235 ГГц – только вертикально поляризованное. Пространственное поле зрения измерений на поверхности Земли составляет 12.5 км для канала 85.5 ГГц и 25 км для других каналов. Для получения информации о содержании водяного пара необходимы данные о радиояркостных температурах на двух каналах 22.235 и 37.0 ГГц.

Поля радиояркостных температур, полученные на двух частотах 22.235 и 37.0 ГГц, заимствованные из базы данных GLOBAL-FIELDS, обработаны с помощью линейного алгоритма, представленного в работе (Ruprecht, 1996), по формуле

$$W = 131.95 - 39.50\ln(280 - T_{22V}) + \\ + 12.49\ln(280 - T_{37V}),$$

где W – значение интегрального водяного пара в кг/м^2 (или в мм) в пространственном пикселе разрешения прибора SSM/I; T_{22V} и T_{37V} – значения радиояркостных температур по каналам 22.235 и 37.0 ГГц (вертикальная поляризация) в пространственном пикселе разрешения прибора SSM/I. Специальная валидация, выполненная в этой работе между восстановленными значениями водяного пара и измеренными по данным радиозондирования (250 профилей) в различных морских акваториях Атлантического океана и с разновременностью измерений между спутниками и радиозондами лучше, чем два часа, показала, что среднеквадратичное отклонение результатов составляет около 2.58 кг/м^2. В результате получаются глобальные поля водяного пара только над акваториями Мирового океана, которые и участвуют в дальнейшей обработке.

В основу обработки и анализа полей водяного пара положен принцип рассмотрения глобальных дистанционных данных как длинных рядов пространственно-временных наблюдений. При этом длительная последовательность полей водяного пара рассматривается не как механическое объединение данных из нескольких файлов, соответствующих моментам съемки, а является, с точки зрения пользователя, основной структурной единицей базы данных, генерируемой по запросу и позволяющей применение к себе дальнейших операций обработки. Выходные данные могут быть записаны в один или несколько файлов. Наиболее естественным методом визуализации полученных данных представляется формирование серий последовательных изображений (видеоклипа).

На основе полученной комплексной базы данных сформирован демонстрационный анимационный ролик, представленный на сайте отдела Исследование Земли из космоса ИКИ РАН (http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_coll.htm) и наглядно демонстрирующий связь областей повышенной концентрации водяного пара и генезиса ТЦ. Отметим при этом, что содержание водяного пара не представлено на материках в виду сложности решения обратной задачи над континентами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В качестве примера продуктов настоящей системы обработки приведем примеры фрагментов анимации глобального поля водяного пара и поля тропического циклогенеза в период эволюции ТЦ Katrina (23.08.2005–03.09.2005). На рис. 1 представлено глобальное поле интегрального водяного пара на акваториях Мирового океана за 26.08.2005, по данным измерений SSM/I на восходящих витках одного спутника DMSP F13. Цветовая схема интенсивностей водяного пара представлена внизу рисунка, при этом максимальным значениям концентрации водяного пара соответствуют багровые области. Данные изображения получены с дискретизацией раз в сутки. Специальным белым прямоугольником выделена область, пройденная ТЦ Katrina за суточный период 26.08.2005. Отметим, что именно эти сутки были началом резкого перелома в эволюции ТЦ Katrina (таблица). Как видно, прямо-

угольник полностью попадает в зону лакуны (черный цвет). На рис. 2 представлено глобальное поле водяного пара за эти же сутки, построенное по композиционной схеме (простое наложение данных на общий кадр) по данным измерений приборов SSM/I со всех трех спутников миссии DMSP. Как и на рис. 1, специальным белым прямоугольником выделена та же область, пройденная ТЦ Katrina за суточный период 26.08.2005. Теперь область, пройденная ТЦ Katrina, покрыта спутниковыми наблюдениями, которые, однако, разнородны и не согласованы по времени. На основе полученной картины можно делать только самые общие выводы об эволюции и развитии ТЦ (в случае же использования данных с одного спутника, рис. 1, сделать какие-либо физические выводы вообще невозможно). Существует принципиальная возможность для извлечения более детальной информации из имеющихся спутниковых данных с применением описанного выше интерполяционного подхода.

В качестве иллюстрирующего примера рассмотрим результат временной интерполяции композитных кадров глобального поля водяного пара, построенного по данным SSM/I в интервале 23 августа–3 сентября 2005 г., в период развития и активности ТЦ Katrina (см. (Покровская, Шарков, 2006)). Интерполяция была проведена с трехчасовым шагом по времени. Затем были отобраны кадры, наиболее близкие по времени к имеющимся записям базы данных GLOBAL-TC (таблица), из этих кадров вырезаны прямоугольные (в проекции Меркатора) фрагменты, покрывающие область северо-западной Атлантики (60° с.ш.–15° ю.ш., 100° в.д.–25° в.д.), затронутой действием ТЦ Katrina. Эти фрагменты собраны на рис. 3 (на вклейках с цветн. рис.). В верхнем углу каждого фрагмента помещена метка времени (по Гринвичу). Белый квадрат указывает положение ТЦ Katrina согласно GLOBAL-TC (Покровская, Шарков, 2006). В нижней части рисунка приведена шкала концентрации водяного пара, значения даны в кг/м^2.

Как видно, интерполированные кадры дают принципиально новую картину эволюции ТЦ Katrina и адекватно отражают динамику состояния рассматриваемой области. Характерная область повышенной концентрации водяного пара возникает, перемещается и распадается в соответствии с фазами зарождения, движения и ухода в высокие широты ТЦ Katrina – модель “верблюда” (Шарков и др., 2011а; 2011б). При этом следует отметить, что резкое нарастание интенсивности ТЦ начинается вечером (по Гринвичу) 26 августа в связи с образованием мощной области водяного пара (с интенсивностью 70–80 кг/м^2). Скорее всего, именно эта область и явилась тем источником скрытой теплоты, которая была переброшена в резко усилившуюся кинематику ТЦ. Отдельные “рассогласования” по времени (опережение или запаздывание пятна по сравнению с данными GLOBAL-TC) можно объяснить обсужденными ранее причинами, главная из которых – недостаточность линейного приближения и необходимость введения нелинейности, а также необходимость более точной коррекции “временных разрывов”, возникающих на опорных композитных изображениях. Аналогичный эффект образования высокоэнергетического купола в поле водяного пара в момент интенсификации ТЦ был обнаружен ранее (Шарков и др., 2011в) при анализе эволюции ТЦ Francisco (2001).

Для количественной оценки соотношения между энергиями скрытого тепла в атмосфере над Мексиканским заливом и энергетического купола над областью ТЦ были рассчитаны временные ряды двух величин, Q и Q_K, по приведенным выше интерполированным кадрам. Величина Q характеризовала интегральное содержание водяного пара (в пересчете в скрытое тепло) северной части Мексиканского залива, ограниченной 32° с.ш., 100° з.д.; 23° с.ш., 82° з.д. Величина Q_K давала интегральное содержание водяного пара (также пересчитанное в скрытое тепло) для небольшой области (радиусом 3.5°) пикового содержания водяного пара, ассоциированной с развивающимся и перемещающимся ТЦ Katrina. На каждом интерполированном кадре осуществлялся поиск точного положения этой области в окрестности зарегистрированного в GLOBAL-TC положения глаза ТЦ Katrina. На каждом кадре использовалась область, расчет внутри которой обеспечивал Q_K локально максимальное значение. В результате были построены временные ряды Q (в интервале с 23.08.2005 по 03.09.2005 через 6 час.) и Q_K (в интервале с 23.08.2005 по 30.08.2005). Расчетные ряды приведены на общем графике (рис. 4). Анализ рис. 4 показывает, что количество общей энергии скрытой теплоты в атмосфере над Мексиканским заливом жестко коррелирует с энергией купола над ТЦ Katrina. При этом следует отметить, что при переходе барического поля ТЦ (в стадии Т) из Атлантического океана в Мексиканский залив к середине дня (по Гринвичу) 27.08.2005 произошло формирование максимального значения энергии купола (рис. 4) при помощи объединения разрозненных областей поля водяного пара в единую систему (рис. 3). К середине следующего дня 28.08 часть этой энергии порядка 6×10^{18} Дж преобразуется в кинематическую составляющую ТЦ, и максимальная скорость ветра в стене глаза ТЦ достигает 78 м/с (таблица). Именно с этой кинетической энергией ТЦ Katrina выходит в ночь на 29.08.2005 на побережье Мексиканского залива в

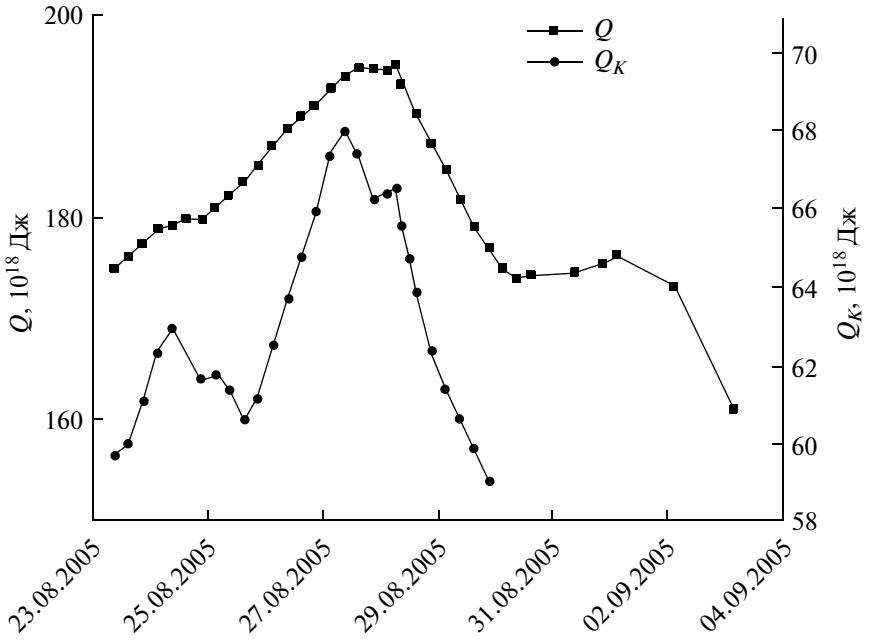


Рис. 4. Временной ход Q и Q_K в период 23.08.2005–03.09.2005. Значения Q отложены по левой шкале, значения Q_K – по правой.

окрестностях г. Новый Орлеан, производя серьезные разрушения. Однако через сутки с утра 30.08.2005 энергия купола резко падает, а он сам распадается (рис. 3). И уже к середине дня ТЦ заполняется и превращается в стадию TD (таблица).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе развит специализированный подход для пространственно-временной интерполяции спутниковых данных, учитывающий кинематику многомасштабных процессов при решении задач ДЗ быстро протекающих процессов в земной атмосфере. Основными достоинствами обсуждаемого подхода является его замкнутость относительно входных (интерполируемых) спутниковых данных, способность оценивать и учитывать кинематику многомасштабных процессов, сравнительно низкая вычислительная стоимость и простота программно-алгоритмической реализации. На основе разработанного программно-алгоритмического подхода решена задача о “мгновенном” источнике скрытой энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования комплекса SSM/I миссии DMSP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М.: Диалог-МИФИ, 2003. 384 с.

Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 360 с.

Гусев А.В. Численная модель гидродинамики океана в криволинейных координатах для воспроизведения циркуляции мирового океана // Вычислительные технологии в естественных науках: Системы глобального масштаба / Под ред. Назиров Р.Р., Щур Л.Н. 2011. Вып. 5. С. 30–48.

Ермаков Д.М., Раев М.Д., Суслов А.И., Шарков Е.А. Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан–атмосфера // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.

Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Шрамков Я.Н. Возможности построения краткосрочных глобальных радиотепловых изображений системы океан–атмосфера на базе программной платформы Stream Handler // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 9–16 .

Мингалев И.В., Мингалев О.В., Мингалев В.С. Численное исследование влияния горизонтальной неоднородности температуры и несферичности Земли на глобальную циркуляцию средней атмосферы // Вычислительные технологии в естественных науках: Системы глобального масштаба / Под ред. Назиров Р.Р., Щур Л.Н. 2011. Вып. 5. С. 65–78.

Покровская И.В., Шарков Е.А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Верс. 3.1. (1983–2005). М.: Полиграфсервис, 2006. 728 с.

Шарков Е. А. Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.

Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. Эволюция тропического циклона Hondo в поле экваториального водяного пара с использованием мультиспектрального подхода // Исслед. Земли из космоса. 2011а. № 1. С. 22–29.

Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. Энергетические особенности множественного тропического циклогенеза по мультиспектральным спутниковым наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 2011б. № 2. С. 18–25.

Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В. Особенности экваториального поля водяного пара при эволюции тропического циклона (ТЦ) на примере ТЦ Francisco (2001) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011в. Т. 8. № 3. С. 310–316.

Bleck R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates // Ocean modeling. 2002. V. 37. P. 55–88.

Gall, Le D. MPEG: a video compression standard for multimedia applications // Interactions of the ACM. 1991. V. 34. № 4. P. 47–58.

Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Trans. ASME, J. Basic Engin. 1960. V. 82. P. 34–45.

Jazwinski A.H. Stochastic processes and filtering theory. L., N.Y.: Academic Press, 1970. 390 p.

Rozier D., Birol F., Cosme E., Brasseur P., Brankart J.M., Verron J. A reduced-order Kalman filter for data assimilation in physical oceanography // SIAM Rev. 2007. V. 49. № 3. P. 449–465.

Ruprecht E. Atmospheric water vapour and cloud water: an overview // Adv. Space Res. 1996. V. 18. № 7. P. 5–16.

Sharkov E. A. Remote sensing of tropical regions. Chichester, N.Y. etc.: John Wiley and Sons/PRAXIS, 1998. 310 p.

Sharkov E.A. Global Tropical Cyclogenesis. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2000. 361 p.

Sharkov E.A. Global Tropical Cyclogenesis. The 2nd Edition. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2011. 650 p.

Shumway R.H., Stoffer D.S. An approach to time series smoothing and forecasting using the EM algorithm // J. Time Ser. Analysis. 1982. V. 3. № 4. P. 253–264.

Search for an Energy Source for the Intensification of TC Katrina by Microwave Satellite Data

D. M. Ermakov[1, 2], A. P. Chernushich[1], E. A. Sharkov[2], I. V. Pokrovskaya[2]

[1] *Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region*

[2] *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

In this paper considered is the possibility of using a specialized approach for spatiotemporal interpolation of satellite data, which takes into account the kinematics of multi-scale processes, in solving problems of remote sensing of fast processes occurring in Earth's atmosphere. Approach is borrowed from the rapidly developing disciplines of computer vision and compression of video data. The main advantages of the method being discussed is that it is closed with respect to the input satellite data, the ability to evaluate and consider the kinematics of multi-scale processes, the relatively low computational cost and ease of software and algorithmic implementation. Based on the developed software and algorithmic approach the problem of "instant" source of latent energy in the intensification of TC Katrina has been solved with the use of data of microwave satellite multichannel radiometer SSM/I, DMSP mission.

Keywords: tropical cyclone, an integral field of water vapor, the critical parameters of the genesis, intensification

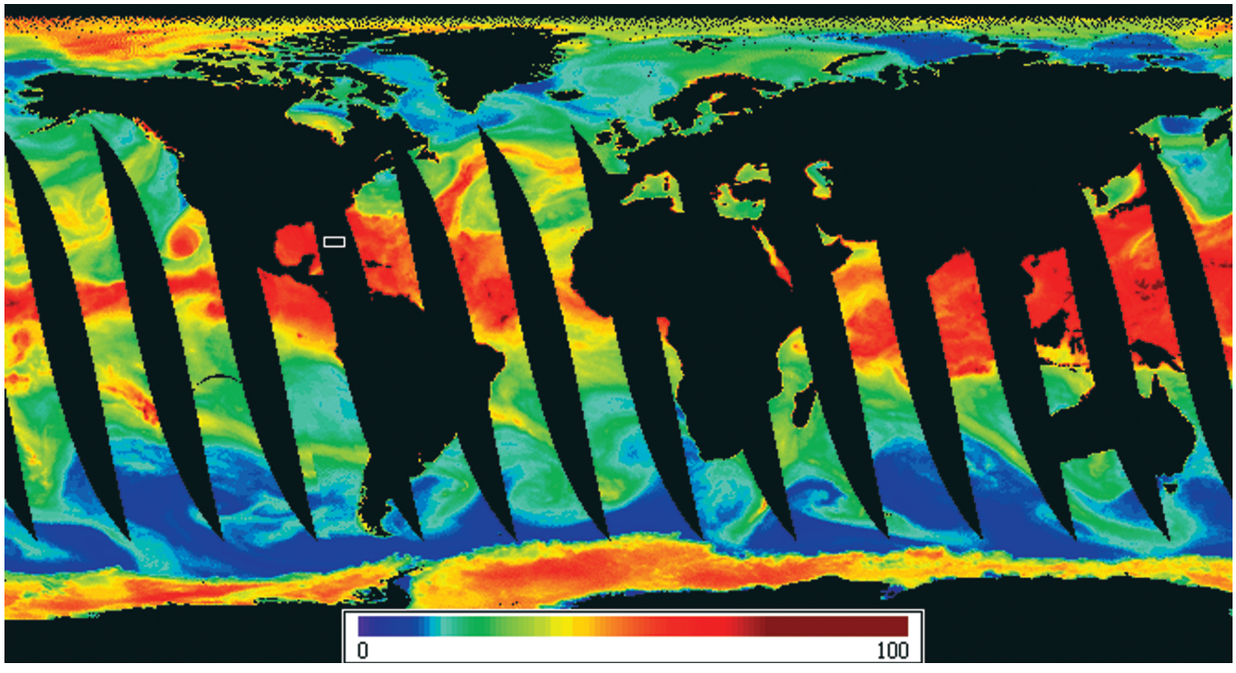


Рис. 1. Поле водяного пара на 26.08.2005, по данным измерений SSM/I на восходящих витках DMSP F13. Шкала в кг/м^2. Белый прямоугольник – область, пройденная ТЦ Katrina за суточный период 26.08.2005.

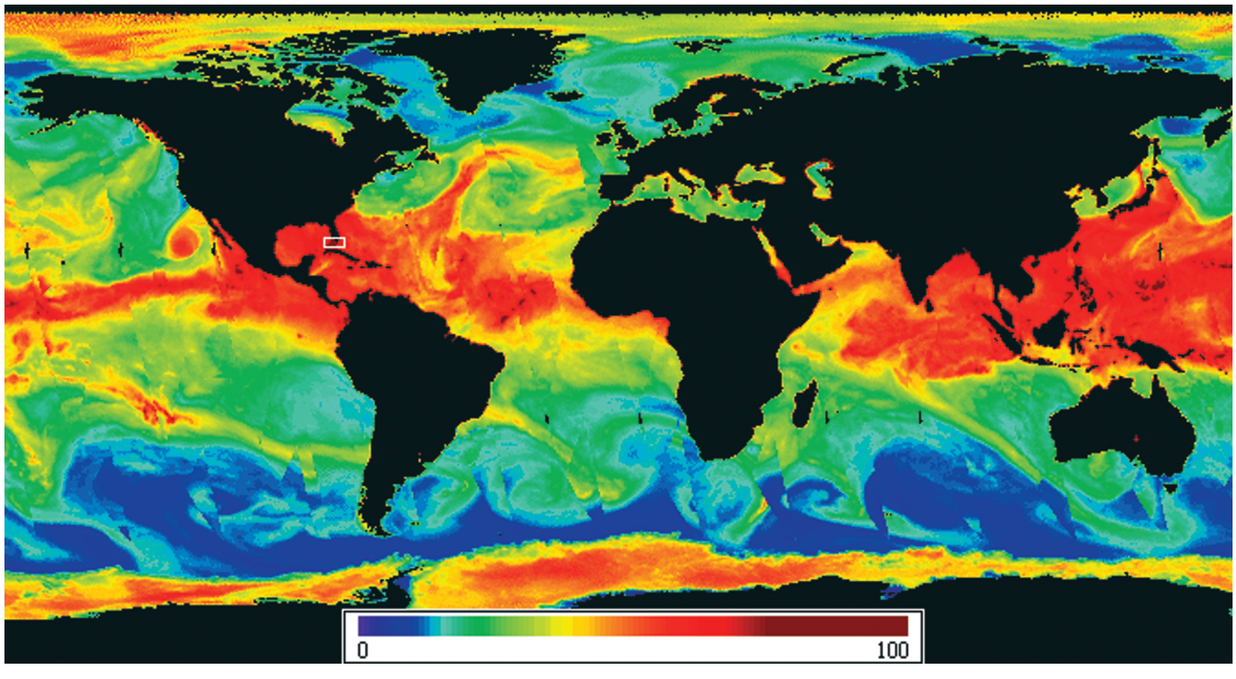


Рис. 2. Поле водяного пара на 26.08.2005, по данным измерений SSM/I со всех спутников DMSP. Шкала в кг/м^2. Белый прямоугольник – область, пройденная ТЦ Katrina за 26.08.2005.

Issled.zemli N4-ver_Ermakova.indd 1 7/17/12 8:24:12 AM

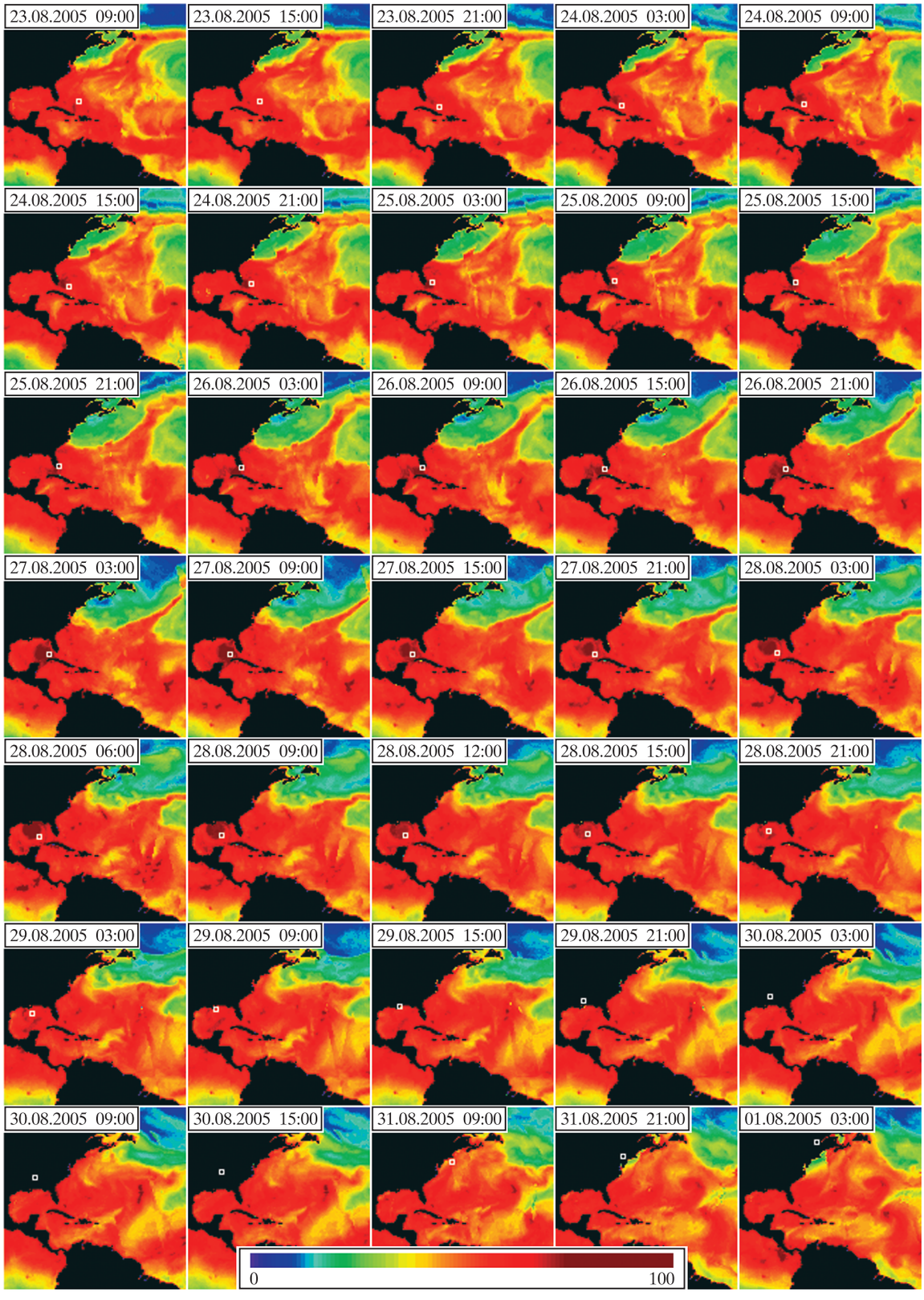


Рис. 3. Пример временной интерполяции поля водяного пара (район северо-западной Атлантики) за 23.08.2005–01.09.2005. Время отмечено по Гринвичу (GMT). Шаг по времени – 3 ч. Белый квадрат – положение ТЦ Katrina, по базе данных GLOBAL-TC (Покровская, Шарков, 2006).

Issled.zemli N4-ver_Ermakova.indd 2 7/17/12 8:24:14 AM

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 57–61

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ФТОРИСТОГО ВОДОРОДА В АТМОСФЕРЕ

© 2012 г. А. В. Поляков[1]*, Ю. М. Тимофеев[1], К. А. Walker[2]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет, С-Петербург

[2]University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada

**E-mail: polyakov@troll.phys.spbu.ru*

Поступила в редакцию 19.12.2011 г.

Анализируются и сравниваются результаты спутниковых и наземных измерений общего содержания (ОС) фтористого водорода (HF). Из измерений профиля HF прибором FTS на спутнике ACE рассчитывается ОС и сопоставляется с данными наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга в 2009–2011 гг. Сравнения показали хорошее качественное согласие сезонного хода ОС HF по данным двух независимых измерений. Немногочисленные (девять случаев) прямые сравнения данных двух типов измерений, согласованных по времени (в течение суток) и месту (не далее 500 км), показали следующие характеристики: средняя разность 8% с превышением спутниковых данных, стандартное отклонение разности 7%. В двух случаях близких пар измерений (ближе 200 км) сопоставления показали разности 1 и 7%. Полученные статистические характеристики разностей двух типов измерений хорошо согласуются с независимыми данными сопоставлений измерений ОС HF по данным ACE-FTS с данными сети NDACC.

Ключевые слова: Фурье-интерферометр, общее содержание, фтористый водород, валидация спутниковых данных, наземные измерения общего содержания

ВВЕДЕНИЕ

Влияние газового состава на радиационные характеристики атмосферы, погоду и климат Земли, а также состояние озоносферы рассмотрено в ходе многочисленных спутниковых программ по изучению газового и аэрозольного состава атмосферы различными методами (Тимофеев, 1989; WMO, 2003). В последнее десятилетие одним из важнейших таких экспериментов является эксперимент ACE (Atmospheric Chemistry Experiment) с ИК-Фурье спектрометром ACE-FTS (Bernath, 2005). Прибор измеряет спектры прямого солнечного излучения при восходах и заходах Солнца с высоким спектральным разрешением (0.02 $см^{-1}$) в области 750–4400 $см^{-1}$, что позволяет определять вертикальные профили содержания более 30 газов (Mahieu et al., 2008). Важным этапом спутниковых измерений является их валидация с помощью независимых, в том числе наземных, измерений. Такие программы валидации данных ACE-FTS описаны, например, в публикациях специальных выпусков журналов Geophysical Research Letters (Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № L15S01) и Atmospheric Chemistry and Physics (Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2008. V. 8).

С января 2009 г. в Санкт-Петербургском государственном университете (СпбГУ) на кафедре физики атмосферы физического факультета (в Петергофе в 28 км к западу от центра Санкт-Петербурга (59.88° с.ш., 29.82° в.д.)) проводятся наземные измерения спектров прямого солнечного излучения в ИК-области спектра измерительным спектральным комплексом на основе Фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения Bruker IFS-125HR (Поберовский, 2010). Эти измерения позволяют определять общие содержания ряда важных климатически активных газов (Поберовский и др., 2010а). Эти же измерения используются для валидации результатов различных спутниковых экспериментов. В данной работе приведены результаты сравнений спутниковых и наземных измерений общего содержания (ОС) фтористого водорода (HF).

СПУТНИКОВЫЕ И НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Солнечная затменная геометрия наблюдений прибора ACE-FTS позволяет проводить около 30 измерений спектров солнечного излучения в сутки. Спектры измерялись в диапазоне прицельных высот от 150 км до верхней границы облаков с вертикальным разрешением 3–4 км. Для различной геометрии шаг измерений по высоте составлял от 1.5 до 6 км. На первом этапе интерпретации измерений определялись вертикальные профили температуры и давления с помощью анализа по-

глощения в линиях CO_2. В дальнейшем анализировалось поглощение в специально выбранных для каждого газа "спектральных окнах". Эти окна выбраны с целью минимизации влияния "мешающих" газов для высот от нижней мезосферы до верхней тропосферы. В результате анализа последовательных измерений солнечных спектров при разных прицельных высотах определены вертикальные профили отношений смеси исследуемого газа, которые интерполированы на высотную сетку с шагом 1 км. При анализе измерений использовалась информация о параметрах тонкой структуры молекулярного поглощения широко известного банка данных HITRAN. Для определения ОС HF выделены 13 спектральных окон в диапазоне 1815–4143 $см^{-1}$ (Batchelor et al., 2009). Подчеркнем, что затменный тип спутниковых измерений характеризуется относительно малым числом измерений в сутки и медленным изменением широты измерений. Сами измерения прибором ACE-FTS осуществляются в тропических, средних и полярных широтах.

Анализ первых результатов наземных измерений содержания HF в России содержится в статьях (Поберовский и др., 2010б; Поляков и др., 2011). В частности в статье (Поляков и др., 2011) приведены предварительные результаты сравнений спутниковых и наземных измерений в период апрель 2009 г.–апрель 2010 г. В настоящей работе использованы наземные измерения с апреля 2009 г. по октябрь 2011 г.

Наземные измеренные спектры Солнца имели спектральное разрешение около 0.005 $см^{-1}$, отношение сигнал/шум, определенное по шумовой дорожке "нулевого" сигнала, колебалось в пределах 400–1600, типичное значение около 1200. Для интерпретации измерений применялась программа SFIT2, используемая на станциях сети NDACC.

Для определения ОС HF использовался спектральный интервал 4038.0–4039.7 $см^{-1}$. Укажем также, что при интерпретации наземных измерений использовались данные о профиле температуры в атмосфере и (в качестве начального приближения) о профиле отношения смеси водяного пара ("мешающего газа") из данных уровня 3 измерений спутника Aqua (приборы AIRS и AMSU_A) http://airs.jpl.nasa.gov/data_products/data_products_toc/. Наши оценки случайной компоненты погрешности определения ОС на основе изменчивости ОС в периоды стабильных состояния атмосферы и функционирования прибора позволяют оценить ее величину в 1–2%. Отметим, что исследование различных источников погрешностей определения ОС HF было осуществлено в работе (Schneider, Blumenstock, 2004). По оценкам этой работы, случайная компонента погрешностей измерений ОС (при близких значениях сигнал/шум) составляет 2.7%, а основной вклад в систематическую погрешность вносит погрешность задания интенсивности линии HF (4.3%). Аналогичные оценки в работе (Senten et al., 2008) дали общую случайную компоненту погрешности в 6% и систематическую погрешность в ~5% (в основном за счет погрешностей задания интенсивности линии поглощения HF). Отметим, что небольшие вариации оценок погрешностей в различных работах обусловлены различными используемыми спектральными интервалами, отличиями в характеристиках аппаратуры, условиях измерений (зенитные углы Солнца и т.д.) и в состоянии атмосферы в моменты измерений.

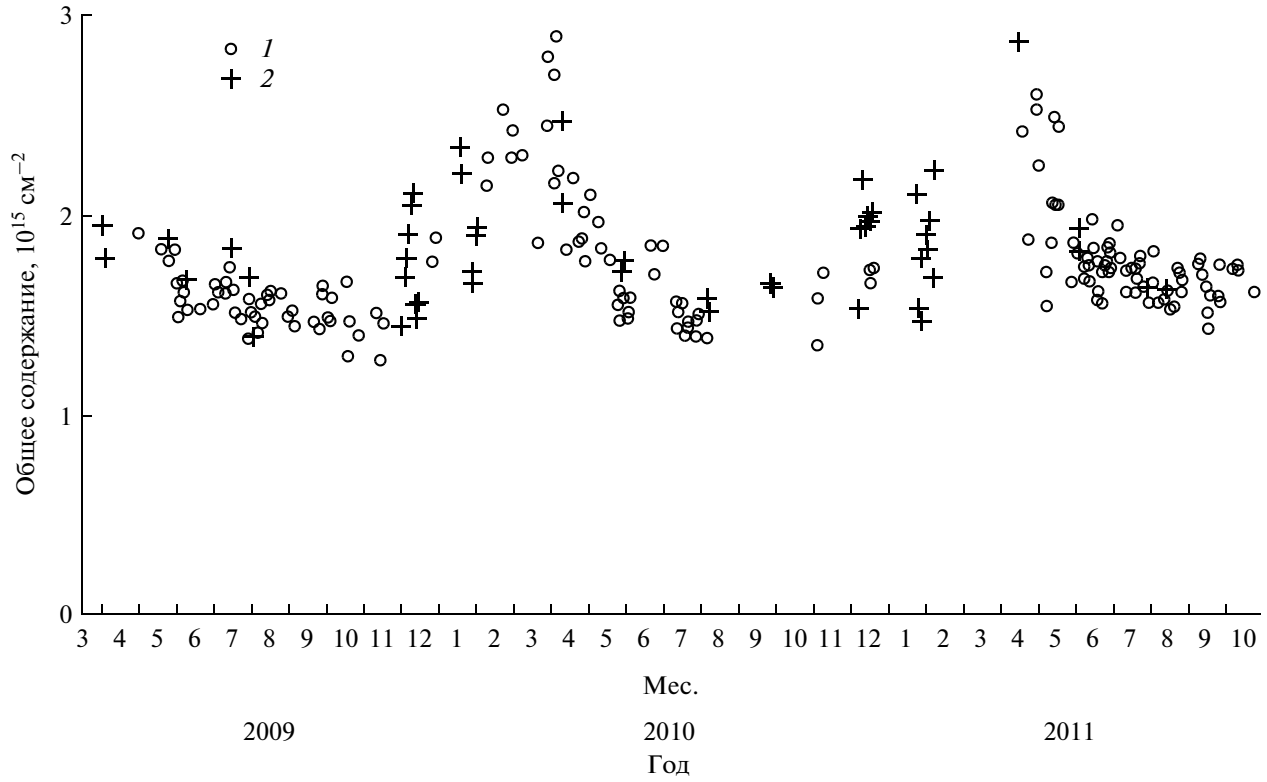
РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЙ

На рисунке показаны среднесуточные значения ОС HF по результатам наземных измерений и значения, полученные интегрированием вертикальных профилей по данным ACE-FTS версии 2.2, измеренных в круге радиусом 500 км с центром в Петергофе. Отметим, что совпадений измерений двух приборов в течение одного дня очень мало (9), поэтому рисунок демонстрирует результаты, полученные двумя приборами в разное время, и позволяет только оценить сходство временных зависимостей результатов двух методов наблюдений. Приведенный рисунок показывает хорошее качественное и количественное согласие измерений. Оба прибора демонстрируют сходные по величине и продолжительности минимумы (летнее-осенние периоды) и максимумы (зимне-весенний периоды) ОС HF и увеличение вариаций содержания HF в зимне-весенние периоды.

Ниже, анализируя количественные характеристики сравнения двух типов измерений, мы будем рассматривать разности их результатов, вычитая из данных спутниковых измерений данные наземных измерений, и различные статистические характеристики этих разностей. Говоря об относительной разности, мы будем иметь в виду отношение разности к данным наземных измерений. Чтобы избежать возможных неоднозначностей, явно укажем используемые характеристики самих значений и их разностей. Мы рассмотрим: $\overline{x}$ – выборочные средние, $\sqrt{\overline{x}^2}$ – среднеквадратичные величины, и σ_x – среднеквадратичные отклонения (СКО, стандартные отклонения) случайной величины x, представленной выборочными значениями $\{x_i\}_{i=1,n}$

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1,n} x_i, \quad \sqrt{\overline{x}^2} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1,n} x_i^2},$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1,n} (x_i - \overline{x})^2}.$$



Результаты измерений ОС HF за период апрель 2009 г.–октябрь 2011 г.: *1* – наземные измерения в Петергофе; *2* – спутниковые измерения ACE-FTS. Расстояние не более 500 км.

Общие количественные характеристики результатов сравнений приведены в таблице.

Согласно данным таблицы, сравнения спутниковых и наземных измерений содержаний HF в Петергофе показывают следующее: средние разности между двумя типами измерений составляют 8% для обоих критериев рассогласований (500 и 1000 км) (при этом наземные измерения дают меньшие значения ОС HF); среднеквадратичные разности составляют для рассогласования в 500 км 11%, а для рассогласований 1000 км – 15%; СКО разностей – 7% и 13% соответственно.

При сопоставлении наземных и спутниковых измерений содержания HF заметное влияние оказывает расстояние между двумя типами измерений. При большом рассогласовании (до 1000 км) среднеквадратичные разности близки к СКО содержания HF (естественным вариациям) за исследованный период (16%).

В двух случаях сопоставлений (при расстоянии менее 200 км между двумя типами измерений) разности составляли 1% и 7%.

Валидация данных измерений содержания HF по версии v2.2 была осуществлена ранее при сравнениях со спутниковыми данными прибора HALOE, аэро-

Статистические характеристики результатов спутниковых и наземных измерений ОС HF и их разностей

Расстояние, км	500	1000
Число сравнений	9	43
Средние СПбГУ, мол/см^2	1.62×10^{15}	1.70×10^{15}
Средние ACE-FTS	1.75×10^{15}	1.84×10^{15}
СКО ОС HF по данным СПбГУ, %	16	16
СКО ОС HF по данным ACE-FTS, %	8	13
Средние относительные разности, %	То же	8
Среднеквадратические относительные разности, %	11	15
Относительные СКО (стандартное отклонение) разности, %	7	13

статными измерениями (приборы FIRS-2 и Mark-IV) и измерениями Фурье-спектрометрами на наземных станциях сети NDACC (шесть станций) (Mahieu et al., 2008). При сравнениях использовались два критерия пространственного согласования измерений – 1000 и 500 км (за исключением тропической станции Reunion Island, для которой это согласования было 1200 км). Временное согласование составляло +/– 24 ч.

Средние разности для различных станций составляли 6.54–13.9%, стандартные отклонения 7.42–10.88%. При анализе сопоставлений всех наземных станций и использовании указанных выше критериев средняя относительная разность составляла 7.4%, стандартное отклонение 11.4%. При ужесточении критерия пространственного рассогласования до 200 км по широте средняя относительная разность уменьшилась до 2.8%, а стандартное отклонение и стандартная ошибка до 8.7%.

Сравнения в работе (Batchelor et al., 2009) обнаружили значительные средние и среднеквадратические разности между измерениями в 2007 г. (средние – 10.57%, среднеквадратические – 15.11%). В 2008 г. эти же величины составляли 3.41 и 14.37% соответственно. В случае использования более жестких критериев пространственно-временного согласования спутниковых и наземных измерений средние разности заметно уменьшились – для измерений 2007 г. до 5.23%, для 2008 г. до 1.14%, – хотя среднеквадратические разности оставались довольно значительными, 8.88% и 16.81% соответственно.

Приведенные величины разностей между спутниковыми и наземными измерениями содержания HF в Петергофе в общем хорошо согласуются с более ранними сопоставлениями (Mahieu et al., 2008; Batchelor et al., 2009). С учетом погрешностей двух типов измерений и пространственно-временными вариациями содержания HF, можно утверждать, что общее содержание HF измеряется прибором ACE-FTS с погрешностями ~5–10%.

ВЫВОДЫ

Наблюдается хорошее согласие сезонного хода результатов наземных и спутниковых измерений. Оба метода демонстрируют сходные сезонные колебания ОС HF и увеличение его изменчивости в зимне-весенний период. Количественные сопоставления показали, что, с учетом погрешностей двух типов измерений и пространственно-временных вариаций содержания HF, общее содержание HF измеряется прибором ACE-FTS с погрешностями не хуже 5–10%.

В работе использованы измерения спутникового эксперимента The Atmospheric Chemistry Experiment (ACE), поддержанного Космическим агентством Канады и Национальным Центром научных и инженерных исследований Канады.

Работа выполнена при поддержке ФЦП Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (госконтракты № П969 от 27.05.2010 и № 16.740.11.0048) и НИР СПбГУ № 11.31.547.2010 и 11.37.28.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 1. С. 56–58.

Поберовский А.В., Макарова М.В., Ракитин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М. Изменчивость общих содержаний климатически активных газов по наземным спектроскопическим измерениям с высоким разрешением // Докл. РАН. 2010а. Т. 432. № 2. С. 257–259.

Поберовский А.В., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Измерения общего содержания фтористого водорода в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010б. № 2. С. 286–288.

Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Яговкина И.С. Сезонные вариации общего содержания фтористого водорода в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 4. С. 521–532.

Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследований газового состава атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.

Bernath, P.F., McElroy C.T., Abrams M.C., Boone C.D., Butler M., Camy-Peyret C., Carleer M., Clerbaux C., Coheur P.F., Colin R., DeCola P., DeMazière M., Drummond J.R., Dufour D., Evans W.F.J., Fast H., Fussen D., Gilbert K., Jennings D.E., Llewellyn E.J., Lowe R.P., Mahieu E., McConnell J.C., McHugh M., McLeod S.D., Michaud R., Midwinter C., Nassar R., Nichitiu F., Nowlan C., Rinsland C.P., Rochon Y.J., Rowlands N., Semeniuk K., Simon P., Skelton R., Sloan J.J., Soucy M.-A., Strong K., Tremblay P., Turnbull D., Walker K.A., Walkty I., Wardle D.A., Wehrle V., Zander R., Zou J. Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): mission overview // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № L15S01. doi:10.1029/2005GL022386.

Batchelor R.L., Kolonjari F., Lindenmaier R., Mittermeier R.L., Daffer W., Fast H., Manney G., Strong K., Walker K.A. Four Fourier transform spectrometers and the Arctic polar vortex: instrument intercomparison and ACE-FTS validation at Eureka during the IPY springs of 2007 and 2008 // Atm. Meas. Tech. Discuss. 2009. V. 2. № 6. P. 2881–2917.

Mahieu E., Duchatelet P., Demoulin P., Walker K.A., Dupuy E., Froidevaux L., Randall C., Catoire V., Strong K., Boone C.D., Bernath P.F., Blavier J.-F., Blumenstock T., Coffey M., Mazi'ere M., De, Griffith D., Hannigan J., Hase F., Jones N., Jucks K.W., Kagawa A., Kasai Y., Mebarki Y., Mikuteit S., Nassar R., Notholt J., Rinsland C.P., Robert C., Schrems O., Senten C., Smale D., Taylor J., T'etard C., Toon G.C., Warneke T., Wood S.W., Zander R., Servais C. Validation of ACE-FTS v2.2 measurements of Cl, HF, CCl_3F and CCl_2F_2 using space-, balloon- and ground-based instrument observation // Atm. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 6199–6221.

Schneider M., Blumenstock T. Subtropical trace gas profiles determined by ground-based FTIR spectroscopy at Izana (28°N, 16°W): Five-year record, error analysis, and comparison with 3-D CTMs // Atm. Chem. Phys. Discuss. 2004. V. 4. P. 5261–5301.

Senten C., De Mazi`ere M., Dils B., Hermans C., Kruglanski M., Neefs E., Scolas F., Vandaele A.C., Vanhaelewyn G., Vigouroux C., Carleer M., Coheur P.F., Fally S., Barret B., Baray J.L., Delmas R., Leveau J., Metzger J.M., Mahieu E., Boone C., Walker K.A., Bernath P.F., Strong K. Technical Note: New ground-based FTIR measurements at Ile de La Reunion: observations, error analysis, and comparisons with independent data // Atm. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 3483–3508.

WMO, The role of satellites in WMO programmes in the 2010s // Techn. Doc. WMO/TD. 2003. № 117. P. 127.

Доступ к данным спутникового зондирования AQUA http://airs.jpl.nasa.gov/data_products/data_products_toc/

Comparisons of Satellite and Ground-Based Measurements of Hydrogen Fluoride Total Content in Earth Atmosphere

A. V. Polyakov, Yu. M. Timofeyev, K. A. Walker

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg

Results of satellite and ground-based measurements of the hydrogen fluoride (HF) total content (TC) were analyzed and compared. HF TCs were calculated from of HF profiles measured by FTS device onboard ACE satellite and compared with data of ground-based measurements near Saint-Petersburg during 2009–2011. The comparisons have shown that HF TO seasonal behaviors from data of two independent measurements are in good qualitative agreement. Few (nine events) direct comparisons of data of two types of measurements, collocated in time (during twenty-four hours) and place (within 500 km), have shown the following: the mean difference is 8% (with exceeding of satellite data), the difference standard deviation is 7%. In two cases of close pairs of measurements (within 200 km), the comparisons gave differences equals to 1 and 7%. Received statistical characteristics of differences of two types of measurements are in good agreement with independent data of comparisons of HF TC from ACE-FTS measurements and data of NDACC network.

Keywords: Fourier-interferometer, total content, hydrogen fluoride, validation of satellite data, ground-based measurements of total content

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 62–77

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ НАКЛОНОВ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЛН ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

© 2012 г. В. Ю. Караев[1]*, М. А. Панфилова[1], Г. Н. Баландина[1], К. Чу[2]

[1] Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

[2] Институт океанологии Китайской академии наук, Циндао

** E-mail: volody@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Поступила в редакцию 14.09.2011 г.

Для повышения достоверности извлекаемой из отраженного радиолокационного (РЛ) сигнала информации предложена оригинальная процедура обработки данных дождевого радиолокатора (Precipitation Radar (PR)). Для восстановления дисперсии наклонов одновременно используются два известных подхода: линейный угловой алгоритм и двухточечный угловой алгоритм. Оба алгоритма основаны на теоретической модели обратного рассеяния, однако отличаются подходом к обработке PR-данных. Точность алгоритмов зависит от исходных данных, поэтому в работе значительное внимание уделяется выявлению выбросов (промахов). Разработанная процедура впервые позволяет оценивать точность восстановления дисперсии наклонов крупномасштабного волнения. Одновременно алгоритмы восстанавливают сечение обратного рассеяния, соответствующее нулевому углу падения, что позволяет сформировать радиолокационное панорамное изображение поверхности. В результате обработки PR-данных построена зависимость дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния от скорости ветра и показано, что сечение обратного рассеяния при надирном зондировании сильнее коррелирует с дисперсией наклонов. Был разработан однопараметрический алгоритм восстановления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния, измеренного при нулевом угле падения.

Ключевые слова: радиолокационное зондирование, обратное рассеяние при малых углах падения, морская поверхность, алгоритмы обработки, измерение дисперсии наклонов

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные (РЛ) методы зондирования морской поверхности активно развиваются и используются для изучения процессов, происходящих на ее поверхности. Серьезным преимуществом активных РЛ-инструментов является независимость получения информации от времени суток и от состояния облачного слоя, что, к сожалению, существенно ограничивает возможности оптических и радиометрических каналов. Также затруднено проведение измерений с использованием этих каналов в области солнечной дорожки.

В настоящее время в режиме непрерывного обзора Мирового океана работают скаттерометры и радиоальтиметры, и собираемая информация активно ассимилируется в численные модели волнения и климатические модели (Hou et al., 2000а; 2000б; Lopez et al., 2000).

Скаттерометры работают в области средних углов падения, когда обратное рассеяние является резонансным. В этом случае рассеивателем является мелкая рябь, чувствительная к скорости приповерхностного ветра. Вклад крупномасштабного волнения сводится в модуляции спектральной плотности резонансной ряби вдоль профиля волны (гидродинамическая модуляция) и к изменению локального угла падения. Увеличение дисперсии наклонов ведет к росту сечения обратного рассеяния по сравнению с горизонтальной поверхностью.

Если спектральная плотность мелкой ряби тесно связана со скоростью ветра, то дисперсия наклонов крупномасштабного волнения зависит не только от скорости ветра, но и от условий формирования волнения, например, длины ветрового разгона, прихода волн зыби. В результате связь скорости ветра и сечения обратного рассеяния является неоднозначной, что приводит к ошибкам при восстановлении скорости ветра только по сечению обратного рассеяния.

С аналогичной проблемой сталкиваются при обработке радиоальтиметрических данных. Сечение обратного рассеяния при надирном зондировании зависит от дисперсии наклонов крупномасштабного волнения и от эффективного коэффициента отражения. Эффективный коэффициент отражения вводится вместо коэффициента Френеля, чтобы учесть ослабление отраженного сигнала мелкой рябью. Таким образом, зависимость сечения обратного рассеяния от скорости ветра

снова является неоднозначной, что приводит к ошибкам при восстановлении скорости ветра по сечению обратного рассеяния при радиоальтиметрических измерениях. Повысить точность восстановления скорости ветра можно за счет независимого измерения дисперсии наклонов.

Скаттерометры и радиоальтиметры выполняют непрерывное измерение скорости приповерхностного ветра. Текущая информация о поле ветра поступает пользователям для оперативного применения и хранится в архивах для последующего анализа, например, для проверки алгоритмов обработки и тестирования климатических моделей.

Независимое измерение дисперсии наклонов позволит сделать зависимость сечения обратного рассеяния от скорости ветра однозначной и, следовательно, повысит точность определения скорости приповерхностного ветра. Кроме того, расширится число измеряемых параметров морского волнения, что улучшит качество численных моделей волнения.

Задача измерения наклонов в полном объеме может быть решена с помощью перспективных радиолокаторов, работающих при малых углах падения, например (Karaev et al., 2006; 2010).

Для проверки новых алгоритмов восстановления дисперсии наклонов, разработанных для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, можно привлечь данные PR-радиолокатора, предназначенного для измерения интенсивности осадков.

Дождевой радиолокатор (Precipitation radar – далее PR-радиолокатор) был разработан в Японии и входит в состав аппаратуры американояпонского спутника, работающего в тропической и субтропической зонах Мирового океана (Tropical Rain Measuring Mission) (NASDA, 2001; Cecil et al., 2005).

В своих работах (Караев и др., 2010; 2012) мы использовали данные PR-радиолокатора для моделирования измерений радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны и были получены первые оценки дисперсии наклонов. Непосредственно задаче восстановления дисперсии наклонов по данным PR-радиолокатора в работе было уделено мало внимания и многие вопросы не обсуждались. В данной статье подробно рассматривается процедура обработки PR-данных и восстановления дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния. Разработанные алгоритмы могут использоваться для формирования поля наклонов по аналогии с полем ветра по существующим РЛ-данным.

В работе обсуждаются способы удаления недостоверных данных (промахов), сравниваются алгоритмы обработки и рассматриваются особенности формирования панорамного РЛ-изображения морской поверхности при малых углах падения. Разработан оригинальный алгоритм определения дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния.

ХАРАКТЕРИСТИКА PR-РАДИОЛОКАТОРА

В 1997 г. стартовал совместный американояпонский проект (Tropical Rainfall Measuring Mission), целью которого является измерение пространственного распределения осадков и их вертикального профиля для определения интенсивности осадков в тропической и субтропической зонах Мирового океана (NASDA, 2001; Cecil et al., 2005). Для решения этой задачи на спутнике была установлена разнообразная измерительная аппаратура, в состав которой входит радиолокатор Ku-диапазона для измерения вертикального профиля осадков, разработанный японскими учеными.

Особенностью PR-радиолокатора является то, что он работает под малыми углами падения и, в отличие от скаттерометра, потенциально способен восстанавливать недоступную ранее информацию о параметрах крупномасштабного волнения, в частности, о дисперсии наклонов.

Схема измерений PR-радиолокатора показана на рис. 1. При движении происходит сканирование в направлении, перпендикулярном направлению полета. Видно, что за счет применения режима сканирования узким лучом в интервале углов падения ±17° удается получить широкую полосу обзора даже при надирном режиме зондирования. Частота сканирования подобрана так, что смещение PR-радиолокатора за время скана составляет около 4 км, т.е. происходит полная засветка полосы обзора при размере пятна около 5 км.

PR-радиолокатор измеряет распределение осадков с высоким разрешением по высоте (250 м по дальности). Сечение обратного рассеяния, измеренное на максимальной дальности, соответствует отражению от поверхности, поэтому оно может быть использовано для определения параметров рассеивающей поверхности.

В настоящее время PR-радиолокатор успешно применяется для измерения интенсивности осадков, однако наличие потенциальной возможности восстановления по данным PR-радиолокатора дополнительной информации привлекает к себе внимание исследователей, и известно несколько попыток использования данных PR-радиолокатора для измерения дисперсии наклонов и скорости приповерхностного ветра, например (Freilich, Vanhoff, 2003; Li et al., 2004; Tran et al., 2007).

Отметим также ряд работ, посвященных восстановлению дисперсии наклонов по самолетным данным, например (Jackson et al., 1992; Hauser et al., 2008).

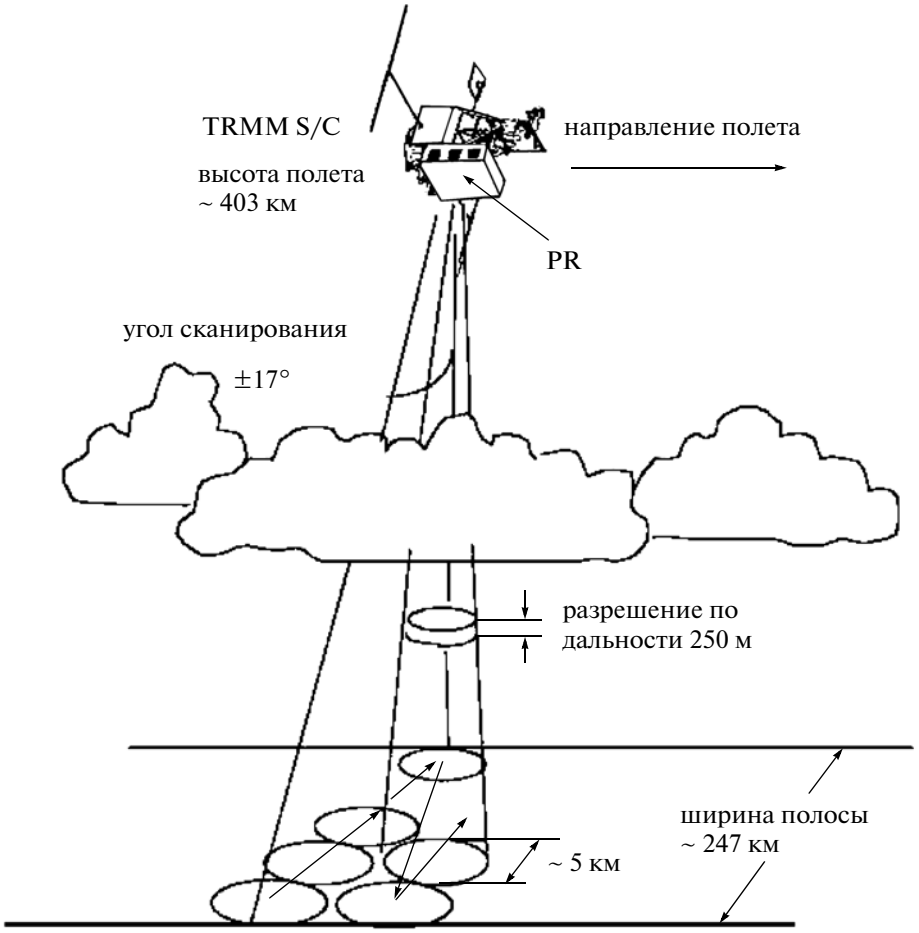


Рис. 1. Схема американо-японской спутниковой системы по измерению осадков в тропиках (The Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM). Дождевой радиолокатор (PR) измеряет в полосе обзора шириной 247 км с разрешением 5 км.

При наличии эффективного алгоритма обработки можно использовать существующие данные PR-радиолокатора для измерения дисперсии наклонов в оперативном режиме и сделать их доступными потребителям.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для проведения данного исследования были взяты измерения сечения обратного рассеяния при малых углах падения, выполненные PR-радиолокатором. Данные были предоставлены Goddard Distributed Active Archive Center и извлечены из стандартного продукта 2A21 (версия-6).

Информация о скорости и направлении ветра, а также о параметрах волнения была получена из архива National Data Buoy Center (NDBC). NDBC-буи обеспечивают измерения скорости и направления ветра каждые 10 мин на высоте 5 м над морской поверхностью.

Последующая обработка позволила сформировать объединенный массив PR и буйковых данных, охватывающий период 2001–2009 гг. В качестве критерия использовались следующие условия: 1) расстояние между буем и ячейкой, где измеряется сечение обратного рассеяния, не превосходит 25 км; 2) временной интервал между РЛ- и буйковыми измерениями не более 10 мин.

При первичной обработке были отсеяны измерения в области дождя, когда происходит значительное ослабление мощности отраженного сигнала.

В результате каждый элемент объединенного массива содержал следующую информацию: 1) скорость и направление ветра; 2) высоту значительного волнения и направление распространения; 3) сечение обратного рассеяния и угол падения; 4) направление движения спутника; 5) направление сканирования; 6) координаты буя и элементарной рассеивающей ячейки.

Пример угловой зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для двух последовательных сканов приведен на рис. 2. Наблюдаемые на рисунке флуктуации мощности отраженного

сигнала достаточно сильные и, следовательно, будут оказывать существенное влияние на работу алгоритмов, используемых для обработки данных. Поэтому задача предварительной подготовки данных, выполняющая удаление грубых промахов из исходных данных, является крайне важной.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ

Проведенный анализ зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения позволяет сделать вывод о соотношении вкладов квазизеркального и брэгговского механизмов рассеяния в сечение обратного рассеяния при малых углах падения (Chu et al., 2012). На рис. 3 на экспериментальные данные (звездочки) наложена теоретическая зависимость (кривая), построенная для квазизеркальной компоненты, и видно, что в подавляющем большинстве случаев вклад брэгговского рассеяния можно не учитывать при углах падения меньше 12°.

Для построения теоретической кривой использовалась хорошо известная модель сечения обратного рассеяния, полученная в приближении метода Кирхгофа. Как известно, при малых углах падения обратное рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению, например (Басс, Фукс, 1972; Valenzuela, 1978; Гарнакерьян, Сосунов, 1978). В результате сечение обратного рассеяния $\sigma_0(\theta)$ при ориентации антенны вдоль оси X задается известной формулой

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{эфф}(0)|^2}{2\cos^4\theta\sqrt{\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2}} \times \exp\left[-\frac{\mathrm{tg}^2\theta\sigma_{yy}^2}{2(\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)}\right], \quad (1)$$

где θ – угол падения; $R_{эфф}(0)$ – эффективный коэффициент отражения при нормальном падении; σ_{xx}^2 и σ_{yy}^2 – дисперсии наклонов волнения вдоль осей X и Y соответственно, а K_{xy} – взаимный ненормированный коэффициент корреляции наклонов вдоль оси X и Y (Басс, Фукс, 1972; Гарнакерьян, Сосунов, 1978).

Как видно из рис. 2, данные PR-радиолокатора для каждого скана представляют собой зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения. В связи с тем, что волнение нельзя считать однородным во всей полосе обзора, превышающей 200 км, при обработке необходимо разбить отражающую поверхность на ячейки, например, 25 × 25 км или 50 × 50 км, и восстанавливать информацию в каждой ячейке независимо. Ячейки такого размера традиционно используются в

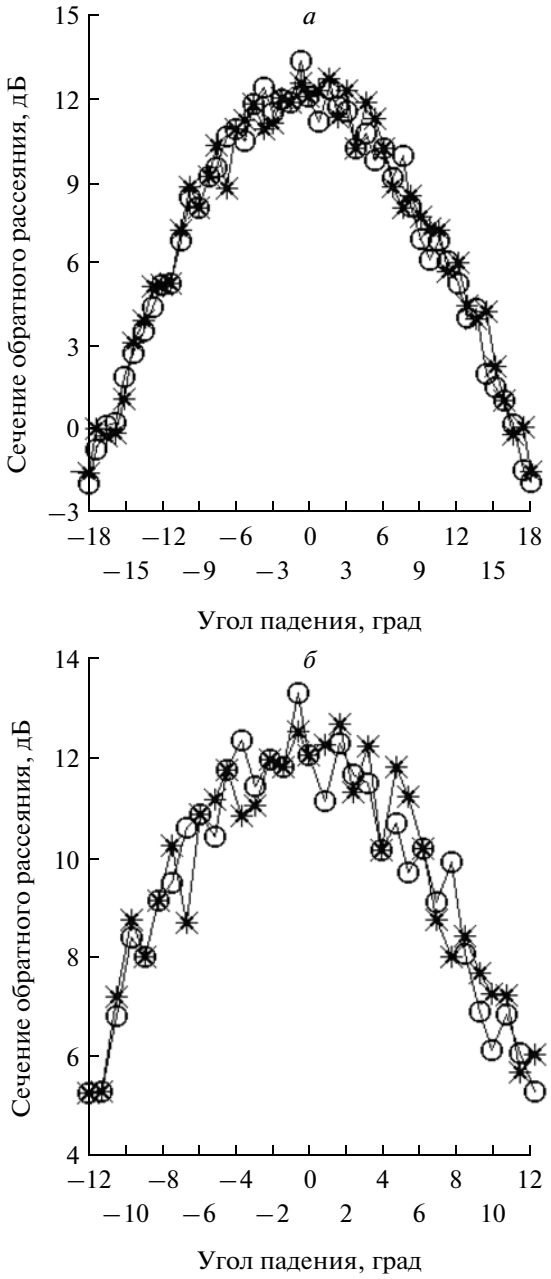


Рис. 2. Пример зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для двух последовательных сканов: *а* – все углы падения, *б* – область квазизеркального рассеяния.

скаттерометрии для восстановления скорости и направления ветра (Halpern, 2000).

Для восстановления дисперсии наклонов по PR-данным воспользуемся двумя известными алгоритмами, например (Караев и др., 2004; Hauser et al., 2008). Оба алгоритма используют угловую зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения. Первый алгоритм можно назвать двухточечным, так как входными параметрами являются сечения обратного рассеяния, измеренные под двумя углами падения.



Рис. 3. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для разных скоростей ветра: звездочки – экспериментальные данные; кривая – модельные оценки.

Двухточечный угловой алгоритм

В рамках модели квазизеркального рассеяния существует возможность восстановления информации о дисперсии наклонов вдоль направления зондирования при условии проведения измерений под несколькими углами падения. Кроме того, можно вычислить сечение обратного рассеяния соответствующее вертикальному зондированию.

Из формулы (1) видно, что выражение для сечения обратного рассеяния можно записать в следующем виде:

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{\text{эфф}}(0)|^2}{\sqrt{2}\cos^4\theta}\frac{\exp\left[-\text{tg}^2\theta b\right]}{\sqrt{\sigma_{yy}^2}}\sqrt{b}, \qquad (2)$$

где

$$b = \frac{\sigma_{yy}^2}{2\left(\sigma_{xx}^2\sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2\right)}.$$

Коэффициент b содержит информацию о дисперсии наклонов крупномасштабного волнения. Если ввести параметр p следующим образом:

$$p = \frac{|R_{\text{эфф}}|^2}{\sqrt{\sigma_{yy}^2}} = \frac{\sqrt{2}\sigma_0(\theta)\cos^4\theta}{\sqrt{b}}\exp(\text{tg}^2\theta b), \qquad (3)$$

то сечение обратного рассеяния при надирном зондировании можно вычислить по простой формуле

$$\sigma_0(0) = \frac{p\sqrt{b}}{\sqrt{2}}. \qquad (4)$$

Используя измерения сечения обратного рассеяния для двух углов падения θ_1 и θ_2 можно определить коэффициент b по следующей формуле:

$$b = \frac{\ln\left(\dfrac{\sigma_0(\theta_1)\cos^4\theta_1}{\sigma_0(\theta_2)\cos^4\theta_2}\right)}{\text{tg}^2\theta_2 - \text{tg}^2\theta_1}. \qquad (5)$$

После этого переходим от сечения обратного рассеяния, измеренного при угле падения θ, к сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения

$$\sigma_0(0) = \sigma_0(\theta)\cos^4\theta\exp\left(\text{tg}^2\theta b\right). \qquad (6)$$

В результате мы видим, что переход от сечения обратного рассеяния при наклонном зондировании к сечению обратного рассеяния при надирном зондировании является корректным и не зависит от направления распространения волнения или ветра. Следовательно, при восстановлении скорости ветра по сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения нет необходимости знать направление распространения волнения или ветра.

Параметр $1/2b$ точно равен дисперсии наклонов вдоль направления зондирования при условии распространения волнения вдоль оси X или Y, так как коэффициент корреляции K_{xy} в этом случае равен 0. При других азимутальных углах дисперсия наклонов будет восстановлена с небольшой погрешностью, величина которой зависит от значения коэффициента корреляции. Отметим, что коэффициент корреляции много меньше дисперсии наклонов, т.е. возможная ошибка будет небольшой.

Таким образом, с помощью описанной выше процедуры мы можем получить оценку дисперсии наклонов вдоль направления зондирования и вычислить сечение обратного рассеяния для нулевого угла падения.

Реальные данные сильно зашумлены, и по одной паре углов падения точно определить коэффициент b можно только случайно, поэтому необходимо рассматривать все возможные пары углов падения и проводить усреднение для вычисления среднего значения коэффициента $\langle b\rangle$.

В качестве альтернативного варианта будем также рассматривать усреднение не коэффициента b, а дисперсии наклонов, т.е.

$$\langle\sigma_{xx}^2\rangle = \left\langle\frac{1}{2b}\right\rangle. \qquad (7)$$

Условие близости средних значений дисперсии наклонов, вычисленных разными способами, будет критерием правильности полученного результата. Наличие выбросов (сильно завышенных

или заниженных значений относительно среднего уровня) приведет к тому, что дисперсии наклонов, вычисленные разными способами, будут отличаться.

Сечения обратного рассеяния, вычисленные по разным формулам (формулы (4) и (6)), тоже можно рассматривать в качестве критерия правильности результата. Применение методов выявления потенциальных ошибок (промахов) при работе алгоритмов обсуждается далее.

Линейный угловой алгоритм

Когда присутствуют значительные флуктуации мощности отраженного сигнала, то для вычисления коэффициента b можно применить другой подход (Elfouhaily et al., 1998; Hauser et al., 2008).

Представим формулу (2) в следующем виде:

$$\ln\left(\sigma_0 \cos^4\theta\right) = \ln\left(\frac{\left|R_{\text{эфф}}(0)\right|^2 \sqrt{b}}{\sqrt{2}\sqrt{\sigma_{yy}^2}}\right) - \text{tg}^2\theta b. \qquad (8)$$

В результате зависимость сечения обратного рассеяния от квадрата тангенса угла падения становится линейной

$$\ln(\sigma_0 \cos^4\theta) = B - k\text{tg}^2\theta, \qquad (9)$$

где

$$b = k, \quad \sigma_0(0) = \exp(B). \qquad (10)$$

Для нахождения сечения обратного рассеяния $\sigma_0(0)$ и коэффициента b необходимо провести регрессионный анализ методом наименьших квадратов и найти коэффициенты для прямой. В данном случае используется исходный массив данных без усреднения по углу падения.

Завершая обсуждение алгоритмов, приведем окончательные формулы для дисперсии наклонов в предположении малости коэффициента корреляции K_{xy}.

Для двухточечного углового алгоритма дисперсия наклонов в направлении зондирования вычисляется следующим образом:

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{1}{2\langle b\rangle} \quad \text{и} \quad \sigma_{xx}^2 = \left\langle\frac{1}{2b}\right\rangle, \qquad (11)$$

для линейного углового алгоритма

$$\sigma_{xx}^2 = -\frac{1}{2k} = -\frac{1}{2b}. \qquad (12)$$

В результате обработки получим три оценки дисперсии наклонов, и, сравнивая их, можно оценить эффективность алгоритмов.

Рассмотрим последовательность обработки данных и восстановления дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния на примере типичного массива. На рис. 4 звездочками показаны исходные измерения, кружками нанесены средние значения для каждого угла падения.

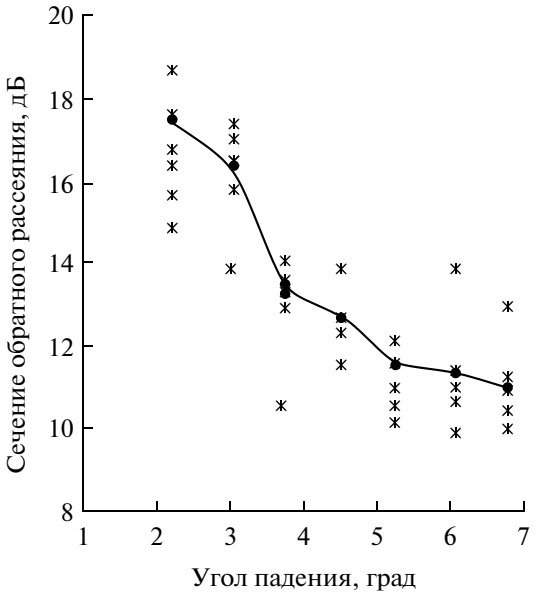


Рис. 4. Пример обрабатываемого массива PR-данных.

Из рис. 4 видно, что зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения является неоднозначной. Измерения относятся к площадке, размером примерно 35 × 28 км, и на таком масштабе волнение в океанологии считается однородным, поэтому предположим, что наблюдаемые флуктуации сечения обратного рассеяния не связаны непосредственно с морским волнением, а обусловлены другими причинами, не имеющими отношения к наклонам. Поэтому задача первого этапа обработки состоит в удалении промахов, которые могут оказать сильное влияние на эффективность работы алгоритмов.

Удаление промахов

Как известно, ни один из критериев удаления промахов не может гарантировать, что всегда успешно решит задачу обнаружения и удаления промахов из массива экспериментальных данных. Чтобы повысить качество данных обычно применяют несколько алгоритмов. В данном исследовании используются четыре известных критерия для обнаружения промахов, и на примере экспериментальных данных рассматривается их работоспособность.

Критерий Ирвина позволяет исключать промахи из исходных данных и может быть записан в следующем виде (Шведков, 1975):

$$\lambda_i = \frac{(y_{i+1} - y_i)}{\sigma}, \qquad (13)$$

Таблица 1. Параметр λ_q

N	Уровень значимости критерия 0.05, λ_q
3	2.2
10	1.5
20	1.3
30	1.2
50	1.1

Таблица 2. Параметр t_p

k	Уровень значимости 0.05, t_p	k	Уровень значимости 0.05, t_p
4	2.78	13	2.16
5	2.57	14	2.14
6	2.45	15	2.13
7	2.36	16	2.12
8	2.31	17	2.11
9	2.26	18	2.1
10	2.23	19	2.09
11	2.2	20	2.09
12	2.18		

Таблица 3. Параметр λ

N	Уровень значимости 0.05, λ
4	1.689
6	1.996
8	2.172
10	2.294
15	2.493
20	2.623
30	2.792
35	2.853

где $y_1 < y_2 < ... < y_i < y_{i+1} < ... < y_N$ – исходный массив данных. Дисперсия σ^2 вычисляется следующим образом:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(y_i - \langle y\rangle\right)^2. \qquad (14)$$

Здесь под $\langle y\rangle$ понимается среднее значение. Максимальное значение λ_i из полученного ряда (см. формулу (13)) сравнивается с табличным значением λ_q. В данном случае значения приведены для вероятности 0.95 и разного числа точек в исходном массиве (табл. 1).

Если $\lambda_i > \lambda_q$, то мы имеем в массиве промах и эта точка удаляется. После этого вычисления повторяются до тех пор, пока не будет удовлетворен критерий или количество точек не станет меньше пяти. В этом случае данный массив удаляется целиком и не используется при дальнейшей обработке.

Критерий Романовского. Другим критерием выявления грубых погрешностей является критерий, предложенный Романовским (Романовский, 1947):

$$\left|y_i - \langle y\rangle\right| \le t_p\sigma, \qquad (15)$$

где t_p – квантиль распределения Стьюдента при заданной доверительной вероятности с числом степеней свободы $k = N - 1$. Значения t_p для вероятности 95% приведены в табл. 2.

Как и в предыдущем случае, при наличии промахов сначала удаляется самый большой промах и затем вычисления повторяются.

Стандартный критерий. Следующий критерий для удаления промахов из исходного массива данных задается парой неравенств (Чашкин, 2010):

$$\nu_1 = \frac{y_{\max} - \langle y\rangle}{\sigma}\sqrt{\frac{N}{N-1}} \quad \text{или} \quad \nu_2 = \frac{\langle y\rangle - y_{\min}}{\sigma}\sqrt{\frac{N}{N-1}}, \qquad (16)$$

где $y_{\max}$ и $y_{\min}$ соответствуют максимальному и минимальному значению в рассматриваемом массиве. Для нахождения промаха необходимо вычислить значения ν_1 и ν_2 и сравнить их с λ. Если параметр λ окажется меньше, то из массива удаляется максимальное или минимальное значение. Значения параметра λ для вероятности 95% приведены в табл. 3.

Критерий Граббса. Для нахождения промаха используется следующий критерий (Grubbs, 1969):

$$\left|y_i - \langle y\rangle\right| > g(\alpha, N)\sigma, \qquad (17)$$

где значения параметра $g(\alpha, N)$ приведены в табл. 4 для вероятности $\alpha = 0.95$.

Как и в случае с другими критериями, при наличии промахов сначала удаляется член ряда, максимально отстоящий от среднего значения. После этого цикл повторяется до момента удовлетворения критерия или достижения пяти точек, после чего эти данные не обрабатываются.

Сравним эффективность критериев на примере приведенного выше исходного массива (см. рис. 4).

Исходный массив содержит 49 точек. После последовательного применения всех критериев было удалено четыре точки и результат показан на рис. 5.

Из рисунка видно, что используемые критерии успешно решают задачу удаления промахов. Каждый критерий по-своему определяет число про-

махов в исходных данных. Критерий Ирвина удаляет две точки, критерий Романовского – три промаха, стандартный критерий – один промах и Граббс не находит промахов. А при последовательном применении удаляется четыре промаха.

Таким образом, удаление промахов повышает качество исходных данных и увеличивается точность измерения дисперсии наклонов и определения сечения обратного рассеяния.

Критерии точности алгоритмов. Для оценки эффективности критериев обнаружения промахов в исходных данных можно использовать коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции характеризует степень зависимости случайных величин x и y и вычисляется следующим образом (Горяинов и др., 1980):

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \langle x\rangle)(y_i - \langle y\rangle)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \langle x\rangle)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \langle y\rangle)^2}} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x\sigma_y}. \quad (18)$$

В качестве одной из переменных используется дисперсия наклонов, а в качестве второй, в зависимости от используемого алгоритма, берется величина, пропорциональная сечению обратного рассеяния σ_0 или $\ln(\sigma_0)$. Сравнивая коэффициенты корреляции до и после удаления промахов, можно оценить эффективность процедуры по удалению промахов, например, до удаления промахов в исходном массиве коэффициент корреляции при использовании линейной регрессии составлял 0.817, а после удаления четырех промахов увеличился до 0.885.

Для получения количественных оценок погрешностей можно воспользоваться следующими формулами:

$$\sigma_{y/x} = \sigma_y\sqrt{1 - R_{xy}^2}, \quad (19)$$

$$\sigma_{x/y} = \sigma_x\sqrt{1 - R_{xy}^2}. \quad (20)$$

И, переходя к относительным погрешностям, получим следующие оценки:

$$\sigma'_{y/x} = \frac{\sigma_{y/x}}{\langle y\rangle} \times 100\%, \quad (21)$$

$$\sigma'_{x/y} = \frac{\sigma_{x/y}}{\langle x\rangle} \times 100\%. \quad (22)$$

Относительные погрешности также будут выступать в качестве критерия при обработке данных. Если коэффициент корреляции низкий и высокая относительная ошибка, то такие данные будут считаться плохими и не учитываться при восстановлении дисперсии наклонов.

Таблица 4. Параметр g (0.95, N)

N	g (0.95, N)
3	1.15
5	1.67
6	1.82
8	2.03
10	2.18
13	2.33
20	2.56
25	2.66
30	2.75
35	2.82
40	2.87
50	2.96

Еще одним критерием оценки точности алгоритмов будет выступать близость значений дисперсий наклонов или сечений обратного рассеяния, восстановленных разными алгоритмами, которую зададим следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{|f_1 - f_2|}{f_1 + f_2} \times 100\%, \quad (23)$$

где под f_1 и f_2 понимаются сравниваемые значения.

В двухточечном угловом алгоритме используются средние значения, которых немного, и применение рассмотренных выше критериев для ис-

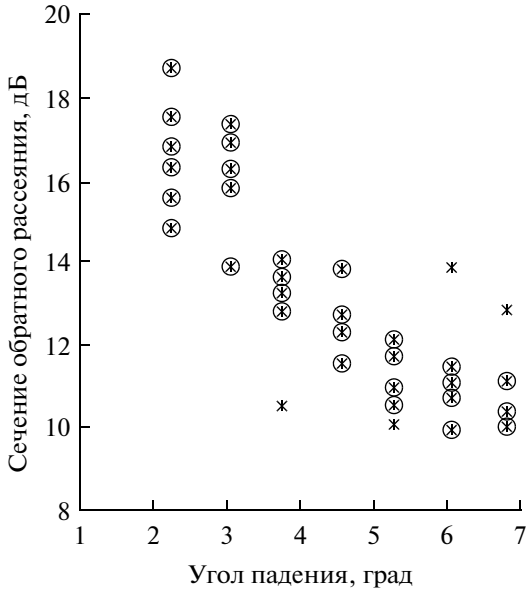


Рис. 5. Пример обрабатываемого массива PR-данных: звездочками нанесены исходные данные, кружками обведены оставшиеся после удаления промахов значения.

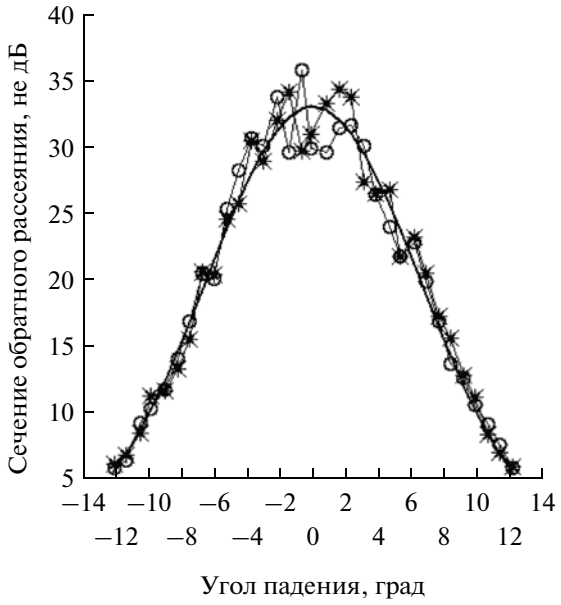


Рис. 6. Пример моделирования угловой зависимости сечения обратного рассеяния для двух последовательных сканов: кружки и звездочки. Кривой показана исходная зависимость.

ходного массива не будет эффективным. Однако при работе алгоритма формируется массив восстановленных дисперсий наклонов и сечений обратного рассеяния. Применение четырех критериев удаления промахов к найденным значениям повысит эффективность применяемых алгоритмов.

Критерии будут применяться как для массива b, так и для $1/b$. После удаления промахов вычисляются средние значения, которые в общем случае не будут равны. Большое различие в дисперсиях наклонов, вычисленных по ним, будет говорить о возможной ошибке. Поэтому здесь предполагается воспользоваться условием (23).

И заключительной проверкой достоверности данных будет сравнение данных, восстановленных двухточечным и линейным угловым алгоритмами. Если использование разных алгоритмов дает близкие значения восстановленных величин, значит, алгоритмы работают правильно. Задавая значение ε, можно регулировать степень "жесткости" при отборе. С одной стороны, такие правила отбора приведут к появлению точек, в которых не удастся восстановить интересующие нас параметры с приемлемой точностью. Однако в данном случае можно будет говорить об уровне точности восстановления интересующих нас параметров.

Таким образом, впервые разработана процедура, позволяющая в процессе обработки РЛ-данных на основе заданных критериев отсеивать точки, в которых интересующие нас параметры не могут быть достоверно восстановлены. В результате точность восстановления дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния будет выше, чем без ее применения.

Для обработки радиоальтиметрических и скаттерометрических данных таких процедур не существует, и обрабатываются все точки за исключением области дождя. В результате, когда выполняется сравнение с данными контактных наблюдений, не менее 2–4% данных оказываются расположенными за пределами 3σ. Обнаружить такие точки в процессе стандартной обработки невозможно, поэтому такие значительные ошибки оставались в восстановленных данных, приводя в дальнейшем к ошибочным выводам.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проверить эффективность работы алгоритмов можно, только сравнивая восстановленные значения с данными контактных измерений. Современные морские буи позволяют измерять скорость и направление ветра, высоту значительного волнения. Дисперсия наклонов крупномасштабного волнения не может быть найдена по данным буев, и прямое сравнение измеренной и восстановленной дисперсии наклонов по имеющимся данным буев провести невозможно. В качестве варианта проверки точности разработанных алгоритмов можно использовать численное моделирование.

Моделировалось полностью развитое ветровое волнение, и вычислялась зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения по формуле (1) в интервале от $-18°$ до $18°$. Это соответствует данным PR-радиолокатора. Для дальнейшей обработки будут использоваться углы падения в интервале $\pm 12.2°$, где работает квазизеркальная модель рассеяния.

На полученную зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения накладывается шум заданной интенсивности $I_{\text{шум}}$, которая задавалась в процентах. Шум предполагался равномерным на интервале $\pm I_{\text{шум}}$.

Сечение обратного рассеяния с учетом шума для угла падения θ вычислялось по следующей формуле:

$$\sigma_{0\text{шум}}(\theta) = \sigma_0(\theta)(1 + I_{\text{шум}}/100). \qquad (24)$$

Пример "зашумленных" данных приведен на рис. 6. Сплошной линией показана исходная зависимость. При вычислении был задан шум интенсивностью 10%, что близко к экспериментальным данным.

Как и при обработке реальных данных, использовались углы падения, меньше $12.2°$. При дальнейшем росте углов падения в модель необходимо включать брэгговскую компоненту, свя-

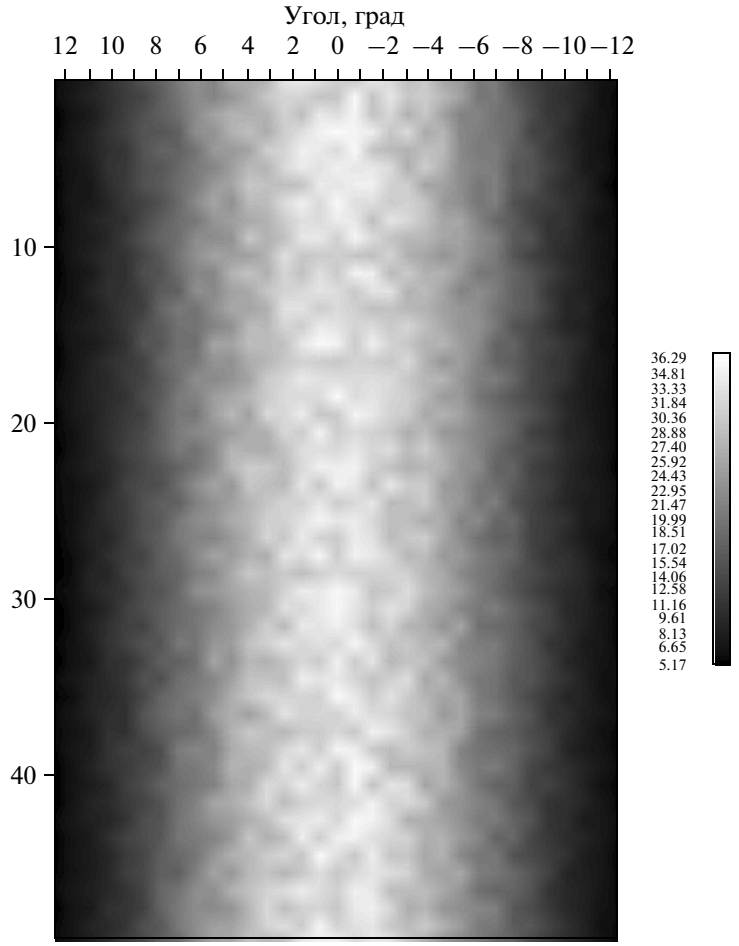


Рис. 7. Полутоновое изображение полосы обзора PR-радиолокатора.

занную с обратным рассеянием на мелкой резонансной ряби.

В качестве примера приведем результаты численного моделирования для случая полностью развитого ветрового волнения: скорость ветра $U_{10} = 5$ м/с, направление распространения – вдоль оси X, спектр волнения задается нашей моделью (Karaev, 1999; Karaev et al., 2008).

На рис. 7 приведены полутоновое изображение для 50 последовательных сканов и 32 углов падения. На рис. 7 сечение обратного рассеяния задано не в дБ. Два скана из этого изображения были приведены на рис. 6.

Дисперсия наклонов для всей моделируемой поверхности одна и та же: $\sigma_{xx}^2 = 0.0121$. В условиях зашумленности данных размер площадки оказывает сильное влияние на точность работы алгоритмов, поэтому вычисления выполнялись для двух размеров площадок: 5×5 и 8×8. Размер элементарной ячейки около 5 км, сдвиг между сканами также около 4 км, поэтому размер обрабатываемых площадок примерно 25×20 км и 40×32 км.

При обработке проходим по полосе обзора площадкой (5×5 или 8×8) со сдвигом в одну элементарную ячейку и вычисляем дисперсию для центральной точки площадки, формируя тем самым новый массив, содержащий вместо сечения обратного рассеяния дисперсию наклонов.

В результате обработки были получены массивы данных, содержащие: 1) дисперсию наклонов, восстановленных с использование линейного углового алгоритма; 2) дисперсию наклонов, восстановленную с помощью двухточечного углового алгоритма; 3) дисперсию наклонов, восстановленную линейным угловым алгоритмом после удаления промахов; 4) дисперсию наклонов, восстановленную двухточечным угловым алгоритмом, после удаления промахов; 5) среднюю дисперсию наклонов по линейному угловому и двухточечному алгоритму.

Из исходного массива (рис. 7) были выбраны типичные сканы, которые использовались для иллюстрации процедуры обработки данных.

На рис. 8 приведены результаты восстановления дисперсии наклонов: звездочки относятся к

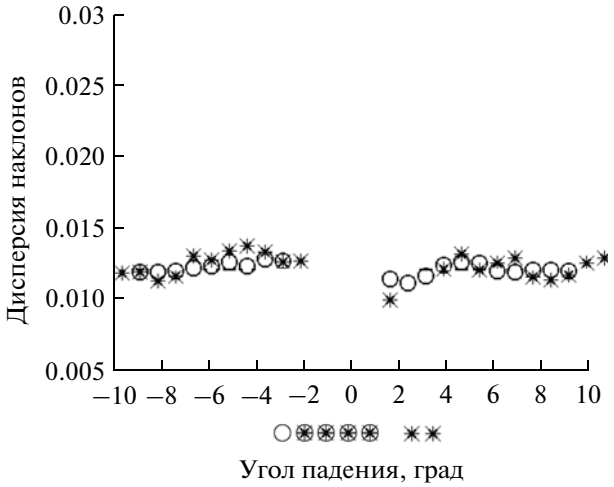


Рис. 8. Пример восстановления дисперсии наклонов с использованием двух алгоритмов: звездочки – для площадки 5 × 5 и кружки – для площадки 8 × 8. Под графиком показаны отсеянные значения при заданной 15% погрешности.

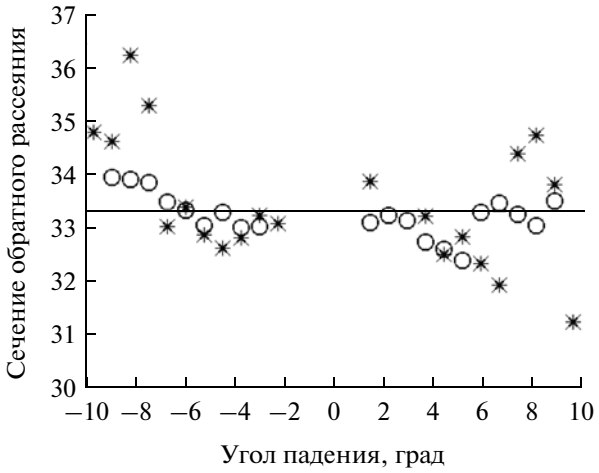


Рис. 9. Пример восстановления сечения обратного рассеяния, соответствующее вертикальному зондированию: звездочки – для площадки 5 × 5 и кружки – для площадки 8 × 8. Прямая соответствует истинному значению сечения.

площадке 5 × 5, кружки – к площадке 8 × 8. Видно, что дисперсия наклонов восстановлена с высокой точностью для обеих усредняющих площадок. Линией показано истинное значение дисперсии наклонов. Проблемы с точностью восстановления дисперсии наклонов возникают при малых углах падения, когда интенсивный шум полностью маскирует зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения.

При обработке была задана точность 15% в соответствии с (23). Критерий не является строгим, тем не менее, он позволяет избавиться от части неправильных значений.

При разработке алгоритма восстановления дисперсии наклонов исходили из условия получения максимально достоверных оценок, т.е. удалялись все подозрительные значения. Считаем, что лучше не иметь для данной элементарной рассеивающей ячейки информации о дисперсии наклонов, чем восстановить ее со значительной ошибкой. Изменять “точность” алгоритма можно задавая величину ε.

Таким образом, в результате проведенного моделирования было показано, что предложенная процедура обработки позволяет отсеивать промахи и с высокой точностью восстанавливать дисперсию наклонов.

В заключение обсуждения на рис. 9 приведем восстановленные значения сечения обратного рассеяния для нулевого угла падения $\sigma_0(0)$. Если на рисунке перейти к дБ, то размах составит менее 0.25 дБ для площадки 8 × 8.

В данном случае от спадающей зависимости сечения обратного рассеяния с увеличением угла падения (см. рис. 6) происходит переход к сечению обратного рассеяния при вертикальном зондировании, т.е. к горизонтальной линии. При малых углах не удается восстановить сечение обратного рассеяния с помощью разработанных алгоритмов из-за высокого уровня шумов.

Увеличение размера анализируемой площадки ведет к уменьшению ошибки. Однако в обоих случаях она не превосходит заданных 15% и существенно ниже точности абсолютной калибровки, которая для PR-радиолокатора составляет около 1 дБ. Для восстановленных значений сечения обратного рассеяния можно применять алгоритмы определения скорости ветра, используемые для радиоальтиметров.

Задача восстановления скорости ветра выходит за рамки данной работы и будет рассмотрена в следующей статье.

Приведем результат преобразования исходного полутонового изображения для сечения обратного рассеяния (см. рис. 7) в сечение обратного рассеяния при надирном угле падения. Таким образом, формируем панорамное РЛ-изображение поверхности.

Результат приведен на рис. 10 (черный цвет соответствует области, где не была достигнута требуемая точность). Переход к сечению обратного рассеяния при надирном зондировании $\sigma_0(0)$ избавил исходное изображение (см. рис. 7) от зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения. Получившееся полутоновое изображение может быть использовано для анализа крупномасштабных процессов на морской поверхности, например, тайфунов. Истинное значение сечения обратного рассеяния, найденное по модели, равно 33.3 или 15.22 дБ.

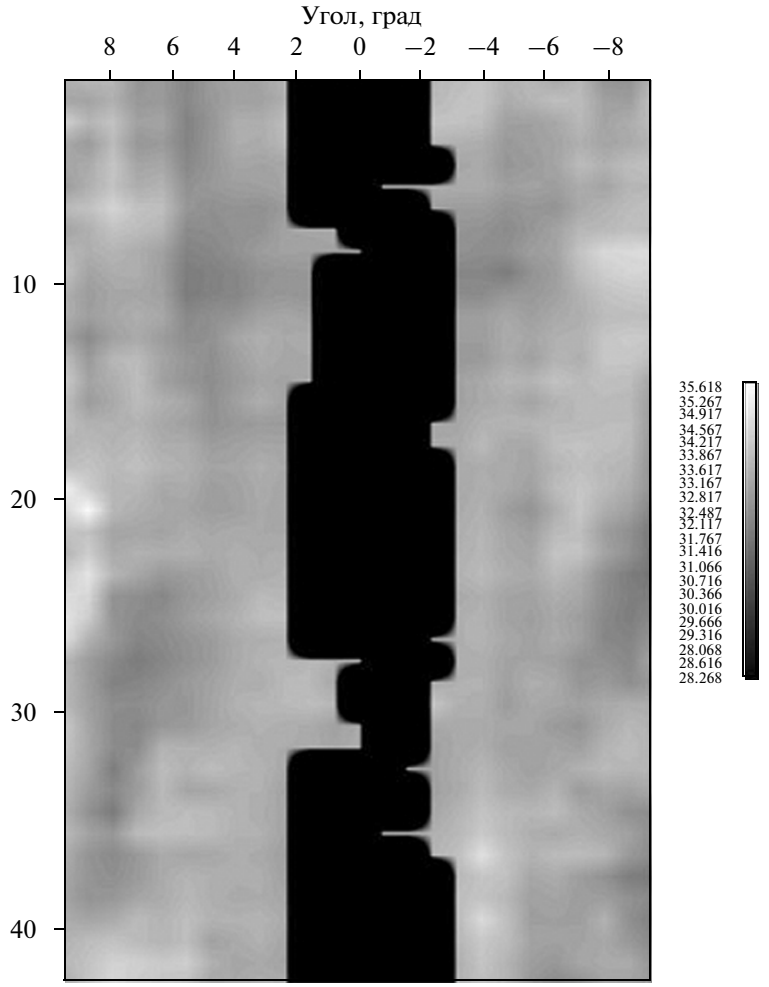


Рис. 10. Полутоновое изображение полосы обзора PR-радиолокатора после обработки.

В данном изображении не присутствует проявлений каких-либо крупномасштабных процессов, что соответствует модельным данным.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ НАКЛОНОВ

После проверки эффективности разработанной процедуры восстановления дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния перейдем к обработке реальных данных. Описание данных приведено выше, поэтому переходим непосредственно к обработке.

Исходный массив данных состоял из 3340 точек и после отсева данных, не удовлетворяющих формальным критериям (углы падения, минимальное число точек – 25), осталось 1844 точки.

К полученному массиву применялась разработанная процедура обработки. В результате обработки были восстановлены дисперсия наклонов и сечение обратного рассеяния для 1038 точек.

Как уже отмечалось, при скорости ветра ниже порогового значения не происходит генерации волн и, следовательно, нельзя говорить о связи параметров волнения с ветром. Поэтому были удалены точки, в которых скорость ветра U_{10} была ниже 3 м/с, и окончательный массив содержал 905 точек.

На рис. 11 приведена зависимость дисперсии наклонов крупномасштабного волнения от скорости ветра U_{10}. Частично наблюдаемый разброс обусловлен тем, что неизвестно направление распространения волнения.

Как обсуждалось выше, происходит восстановление дисперсии наклонов вдоль направления зондирования. Для определения полной дисперсии наклонов необходимо провести второе измерение под углом 90° относительно первого, и тогда полная дисперсия будет равна

$$\sigma^2_{\text{накл}} = \sigma^2_{xx} + \sigma^2_{yy}.$$

В нашем распоряжении нет второго измерения, поэтому в качестве оценки полной диспер-

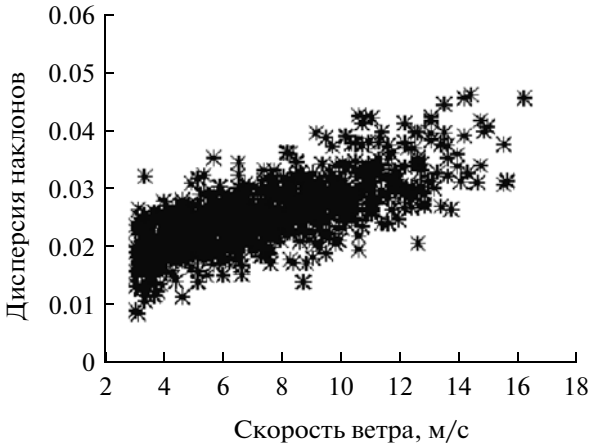


Рис. 11. Зависимость дисперсии наклонов от скорости ветра.

сии наклонов будем использовать следующую величину:

$$\sigma^2_{\text{накл}} = 2\sigma^2_{xx}.$$

Если предположить, что $\sigma^2_{yy} = 0.7\sigma^2_{xx}$ (Cox, Munk, 1954), то интервал изменения определенной таким образом полной дисперсии наклонов $\sigma^2_{\text{накл}}$ составит от $1.4\sigma^2_{xx}$ до $2\sigma^2_{xx}$, при условно правильном значении $1.7\sigma^2_{xx}$.

Традиционно по сечению обратного рассеяния восстанавливается скорость приповерхностного ветра. Связь сечения обратного рассеяния с высотой значительного волнения слабая, а другие статистические параметры не измеряются существующими морскими буями с необходимой точностью.

В результате проведенной обработки PR-данных были измерены наклоны крупномасштабного волнения, поэтому есть возможность построить зависимость сечения обратного рассеяния от дисперсии наклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны падающего излучения, волнения.

На рис. 12*а* показана связь скорости ветра, измеренной морским буем, и сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения $\sigma_0(0)$, определенного по PR-данным. Наблюдаемый разброс говорит о том, что точность определения скорости ветра по сечению обратного рассеяния не будет высокой.

Зависимость сечения обратного рассеяния от дисперсии наклонов крупномасштабного волнения показана на рис. 12*б*. Видно, что корреляция дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния существенно выше, т.е. по измеренному сечению обратного рассеяния надо восстанавливать не скорость ветра, а дисперсию наклонов.

Такой вывод прогнозируем, если посмотреть на формулу (1). Сечение обратного рассеяния зависит от дисперсии наклонов, а зависимость от скорости ветра проявляется более сложным образом: через крупномасштабные наклоны ветровых волн и через интенсивность мелкой ряби, влияющей на эффективный коэффициент отражения.

Измерение сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения выполняется радиоальти-

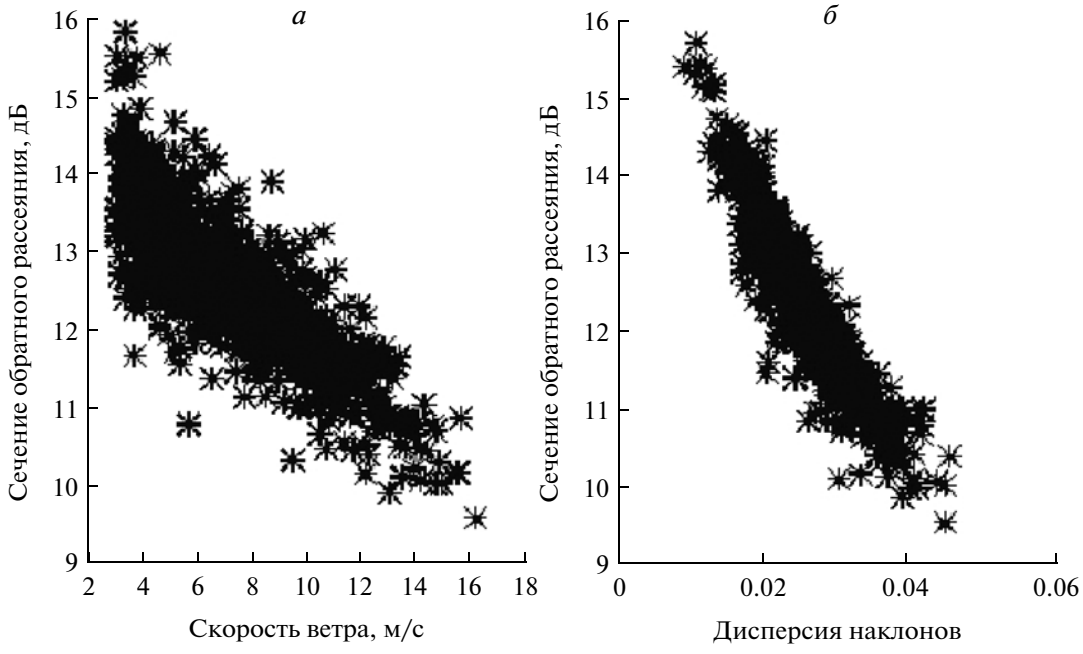


Рис. 12. Зависимость сечения обратного рассеяния: *а* – от скорости ветра, *б* – от дисперсии наклонов.

метрами, поэтому помимо скорости ветра по имеющимся радиоальтиметрическим данным можно определять дисперсию наклонов.

Разработка полноценного алгоритма представляет собой отдельную задачу, поэтому здесь приведем оценки возможностей восстановления дисперсии наклонов в рамках простой модели, связывающей дисперсию наклонов и сечение обратного рассеяния.

Предположим, что зависимость сечения обратного рассеяния и дисперсии наклонов задается следующим выражением:

$$\sigma^2_{\text{накл}} = A + B/\sigma_0(0) + C/\sigma^2_0(0) + D/\sigma^3_0(0),$$

где коэффициенты можно найти с помощью регрессии. В результате регрессионной обработки получим следующую формулу для вычисления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния:

$$\sigma^2_{\text{накл}} = -0.00591 + 0.74352/\sigma_0(0) - 4.07817/\sigma^2_0(0) + 13.7317/\sigma^3_0(0).$$

Результаты восстановления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния $\sigma_0(0)$ приведены на рис. 13. Дисперсия наклонов, восстановленная по сечению обратного рассеяния, сравнивалась с дисперсией наклонов, восстановленной по PR-данным, которые предполагаются истинными.

Для получения количественной оценки точности алгоритма было вычислено среднеквадратическое отклонение СКО = 0.00209. Таким образом, по сечению обратного рассеяния, измеренного при надирном зондировании, можно восстановить полную дисперсию наклонов с высокой точностью.

Радиоальтиметры измеряют высоту значительного волнения, поэтому совмещение информации о высоте волнения и дисперсии наклонов улучшит описание морского волнения.

Интересные возможности диагностики состояния приповерхностного слоя связаны с вычислением эффективного коэффициента отражения. Это вопрос будет рассмотрен при разработке двухпараметрического алгоритма восстановления скорости ветра в следующей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время данные космических радиолокаторов активно используются для получения информации о состоянии приповерхностного слоя над морской поверхностью, в частности, скаттерометры восстанавливают поле ветра (скорость и направление ветра), радиоальтиметры измеряют высоту значительного волнения и определяют скорость ветра.

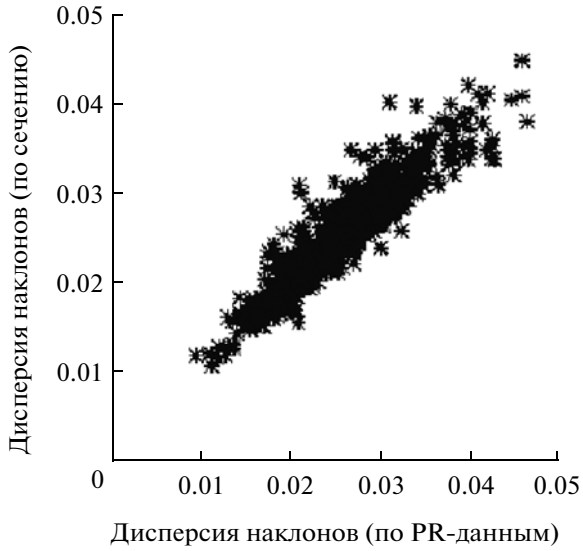


Рис. 13. Сравнение дисперсии наклонов, восстановленных по сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения с дисперсией наклонов, восстановленных по PR-данным.

Из активных радиолокаторов непрерывные измерения осуществляет также PR-радиолокатор, измеряющий интенсивность осадков. Радиолокатор обладает высоким разрешением по дальности и формирует высотный профиль для сечения обратного рассеяния с разрешением по дальности 250 м и отраженный сигнал на максимальной дальности связан с отражением от земной поверхности. В результате выполнения сканирования в направлении, перпендикулярном траектории движения, формируется массив данных, содержащий информацию о сечении обратного рассеяния под разными углами падения.

Известны алгоритмы, которые позволяют по PR-данным определить дисперсию наклонов и скорость приповерхностного ветра. Наличие пространственных масштабов изменчивости морского волнения приводит к ограничению размера массива данных, используемых для обработки, что может приводить к существенным ошибкам при решении обратной задачи. В настоящий момент не существует процедур обработки, позволяющих выявлять при обработке такие точки и удалять ошибочные значения.

В нашей работе подробно рассматривается новая процедура обработки PR-данных. Для восстановления дисперсии наклонов одновременно используются два известных подхода: линейный угловой алгоритм и двухточечный угловой алгоритм. Оба алгоритма основаны на теоретической модели обратного рассеяния и отличаются только подходом к обработке PR-данных.

На точность алгоритмов влияет качество исходных данных, поэтому в работе большое вни-

мание уделяется выявлению выбросов (промахов). Причина их образования в работе не рассматривается, а решается задача их удаления. В линейном угловом алгоритме удаление промахов происходит в исходном массиве, а при использовании двухточечного алгоритма промахи удаляются из восстановленных дисперсий наклонов. Последующее сравнение результатов обработки двумя алгоритмами позволяет отсеять значения, которые не удовлетворяют заданной точности. Разработанная процедура впервые позволяет оценивать точность восстановления дисперсии наклонов. Это приводит к уменьшению числа точек, для которых восстанавливается дисперсия наклонов, однако задача повышения достоверности восстанавливаемой информации является приоритетной.

Помимо дисперсии наклонов, по PR-данным можно найти сечение обратного рассеяния, соответствующее нулевому углу падения и сформировать РЛ-панорамное изображение поверхности. При наличии на поверхности крупномасштабных процессов они могут быть обнаружены и исследована их структура.

С помощью численного моделирования был создан тестовый массив данных, для которого была известна дисперсия наклонов и сечение обратного рассеяния. На исходные данные был наложен равномерный шум интенсивностью 10% и получившийся массив был использован для тестирования процедуры обработки. Результаты обработки показали, что предложенная процедура эффективно работает и удаляет точки, где дисперсия наклонов восстанавливается с большой погрешностью.

Для дальнейшего тестирования алгоритмов обработки был сформирован массив данных, включающий в себя РЛ-данные и данные буев: 1) скорость и направление ветра; 2) высота значительного волнения и направление распространения; 3) сечение обратного рассеяния и угол падения; 4) направление движения спутника; 5) направление сканирования; 6) координаты буя и элементарной рассеивающей ячейки. В результате обработки была получена зависимость дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния от скорости ветра.

Проведенный анализ показал, что сечение обратного рассеяния значительно сильнее коррелирует с наклонами и, следовательно, по сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения надо восстанавливать не скорость ветра, а дисперсию наклонов. Был разработан однопараметрический алгоритм для восстановления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния, измеренному при нулевом угле падения. В этом случае среднеквадратическое отклонение составит всего 0.00209. Данный алгоритм может использоваться для обработки радиоальтиметрических данных, и впервые будут одновременно измерены высота значительного волнения и дисперсия наклонов, что открывает новые возможности для мониторинга состояния приповерхностного слоя океана.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 10-05-00181а и № 11-05-97014-р-п-а) и программой ОФН РАН “Радиофизика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Басс Ф., Фукс И. Рассеяние волн статистически неровной поверхностью. М.: Наука, 1972. 424 с.

Гарнакерьян А., Сосунов А. Радиолокация морской поверхности. Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1978. 144 с.

Горяинов В., Журавлев А., Тихонов В. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи / Под ред. Тихонова В. М.: Сов. радио, 1980. 544 с.

Караев В., Каневский М., Баландина Г., Мешков Е., Челленор П., Срокосз М., Гомменджинджер К. Новые средства дистанционной диагностики океана: радиолокатор СВЧ-диапазона с ножевой диаграммой направленности антенны // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 2. С. 41–52.

Караев В.Ю., Каневский М.Б., Мешков Е.М., Чу К. Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабного волнения по данным PR радиолокатора // Восьмая всерос. конф. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 15–19 ноября 2010, Москва, ИКИ РАН. 2010. С. 186.

Караев В., Мешков Е., Chu X., He Y. Применение данных PR-радиолокатора для имитации натурных измерений обратного рассеяния радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны // Изв. вузов. Радиофизика. (В печати).

Романовский В.И. Основные задачи теории ошибок. М.: Гостехиздат, 1947. 116 с.

Чашкин Ю.Р. Математическая статистика: Анализ и обработка данных. Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. 236 с.

Шведков Е. Элементарная математическая статистика в экспериментальных задачах материаловедения. Киев: Наук. думка, 1975. 111 с.

Cecil D.J., Goodman S.J., Boccippio D.J., Zipser E.J., Nesbitt S.W. Three Years of TRMM Precipitation Features. Part I: Radar, Radiometric, and Lightning Characteristics // Month. Weather Rev. 2005. V. 133. № 3. P. 543–566.

Chu X., He Y., Karaev V., Chen G. Relationships between Ku-band radar backscatter and integrated wind and waves parameters at low incidence angles // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2012, in press.

Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Opt. Soc. America. 1954. V. 44. № 11. P. 838–850.

Elfouhaily T., Vandemark D., Gourrion J., Chapron B. Estimation of wind stress using dual-frequency Topex data // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № C11. P. 25101–25108.

Freilich M.H., Vanhoff B.A. The relation between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence

angles from TRMM Precipation Radar measurements // J. Atm. Ocean. Tech. 2003. V. 20. № 4. P. 549–562.

Grubbs F. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples // Technometrics. 1969. V. 11. № 1. P. 1–21.

Halpern D. Satellites, Oceanography and Society. Amsterdam: Elsevier, 2000. 368 p.

Hauser D., Caudal G., Guimbard S., Mouche A. A study of the slope propability density function of the ocean waves from radar observations // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № C02006. doi:10.1029/207JC004264.

Hou A.Y., Ledvina D.V., da Silva A.M., Zhang S.Q., Joiner J., Atlas R.M., Huffman G.J., Kummerow C.D. Assimilation of SSM/I-Derived Surface Rainfall and Total Precipitable Water for Improving the GEOS Analysis for Climate Studies // Month. Weather Rev. 2000. V. 128. № 3. P. 509–537.

Hou A.Y., Zhang S.Q., da Silva A.M., Olson W.S. Improving Assimilated Global Datasets Using TMI Rainfall and Columnar Moisture Observations // J. Clim. 2000. V. 13. № 23. P. 4180–4195.

Jackson F.C., Walton W.T., Hines D.E. Sea surface mean square slope from Ku-band bakscatter data // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 11411–11427.

Karaev V. The new model of the directional frequency spectrum and remote sensing // XXVI General Assembly of the URSI. 13–21 August 1999. Univ. of Toronto, Canada. FP. 65.

Karaev V., Kanevsky M., Balandina G., Meshkov E., Challenor P., Srokosz M., Gommenginger C. A rotating knife-beam altimeter for wide-swath remote sensing of the ocean: wind and waves // Sensors. 2006. V. 6. P. 260–281. www.mdpi.org/sensors/list06.htm#new

Karaev V., Kanevsky M., Meshkov E. The effect of sea surface slicks on the Doppler spectrum width of a backscattered microwave signal // Sensors. 2008. V. 8. P. 3780-3801. DOI:10.3390/s8063780. http://www.mdpi.org/sensors/papers/s8063780.pdf

Karaev V., Kanevsky M., Meshkov E., Kovalenko A. The concept of the advanced space microwave radar for remote sensing of the ocean at small incidence angles // PORSEC 2010. 18–23 October 2010. National Taiwan Ocean Univ., Keelung, Taiwan. 2010. P. 23.

Li L., Im E., Connor L., Chang P.S. Retrieving ocean surface wind speed from the TRMM precipitation radar measurements // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2004. V. 42. № 6. P. 1271–1282.

Lopez J.W., Kantha L.H. A Data-Assimilative Numerical Model of the Northern Indian Ocean // J. Atm. Ocean. Tech. 2000. V. 17. № 11. P. 1525–1540.

NASDA. TRMM Data Users Handbook / Eds. Earth Observation Center. National Space Development Agency of Japan. 2001.

Tran N., Chapron B., Vandemark D. Effects of long waves on Ku-band ocean radar backscatter at low incidence angles using TRMM and altimeter data // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2007. V. 4. № 4. P. 542–546.

Valenzuela G.R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves: A review // Boundary-Layer Meteorol. 1978. V. 13. P. 61–86.

Retrieval of the Slope Variance by Microwave Measurements

V. Yu. Karaev[1], M. A. Panfilova[1], G. N. Balandina[1], X. Chu[2]

[1] Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia
[2] Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Quindao, China

For increasing of reliability of the information obtained from the microwave signal backscattered from the ocean surface, the original procedure of data processing of the precipitation radar (PR) has been developed. For retrieval of variance of surface slopes the two known approaches are simultaneously used: 1) linear angular algorithm and 2) point-to-point angular algorithm. Both algorithms are based on theoretical model of backscattering, however they differ by the approach to processing of PR-data. Accuracy of retrieval algorithms depends on quality of initial data, therefore in our paper the considerable attention is given to finding of outlyings (blunders). In linear angular algorithm the removal of outlyings occurs in an initial data set, and at using of point-to-point algorithm outlyings are removed from the restored variance of slopes. The developed procedure allows estimating for the first time the accuracy of retrieval of a variance of surface slopes caused by large-scale waves. Simultaneously algorithms restore the normalized radar cross section corresponding to a vertical probing. It allows obtaining the panoramic radar image of a sea surface. As a result of processing of PR data the dependences of a variance of slopes and normalized radar cross section on wind speed has been obtained and is shown, that the radar cross section for vertical incidence angle correlates with a variance of slopes more strongly. The one-parametrical retrieval algorithm of a variance of slopes on backscattered radar cross section measured at zero incidence angle has been developed.

Keywords: radar probing, backscattering at small incidence angles, sea surface, data processing algorithm, measurements of variance of slopes

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 78–84

ОБЗОРЫ

АЭРОФОТОРАЗВЕДКА. ПРОШЛОЕ–НАСТОЯЩЕЕ–БУДУЩЕЕ[1]

© 2012 г. Л. М. Матиясевич

Поступила в редакцию 21.01.2012 г.

Книга не является историей аэрофоторазведки, ее задача показать, какое значение придавалось аэрофоторазведке в разные периоды истории нашей страны; к каким трагическим последствиям привела недооценка аэрофоторазведки руководством Красной Армии; как после Великой Отечественной войны вновь об аэрофоторазведке забыли; как непрост был наш путь в космос, и какую роль в создании космической разведки сыграл Сергей Павлович Королёв; и, наконец, напомнить уроки прошлого, наметить пути дальнейшего развития аэрофоторазведки – призвать к их обсуждению и реализации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

I. Дореволюционный период

В 1855 г. французский фоторепортер Надар получил “Привилегию” на “воздушную фотографию”. В 1858 г. он же с привязного воздушного шара сфотографировал Париж, а в следующем году, при сражении французских войск с австрийскими у Солферино, сфотографировал с привязного воздушного шара австрийские позиции.

Таким образом, Франция – родина воздухоплавания (1783 г.) и фотографии (1839 г.), – дала старт воздушной фотосъемке и разведке.

Несовершенство фотографических процессов еще долгое время сдерживало широкое применение воздушной фотосъемки. Однако военная и научно-техническая интеллигенция дореволюционной России проявляла живой интерес к воздухоплаванию и фотографии, активно искала пути военного и гражданского применения этих новых открытий, внесла свой вклад в их дальнейшее совершенствование.

Главной движущей силой развернувшихся работ по созданию фотоаппаратов, совершенствованию фотографических процессов, выполнению различных фотосъемок была личная инициатива людей различных профессий, но увлеченных новым чудом – “светописью”.

О всеобщем интересе к этим новым направлениям науки и техники свидетельствуют, в частности, многочисленные издававшиеся в России журналы: “Фотограф”, “Воздухоплаватель”, “Русский фотографический журнал”, “Фотограф-любитель”, “Техника воздухоплавания” и др.

В этом же направлении действовали общественные и государственные организации, в частности, Русское техническое общество (РТО) и Главное инженерное управление военного министерства.

В качестве примера оперативности действий военного ведомства приведен следующий эпизод.

В 1869 г. начальник Главного штаба подал военному министру записку о необходимости использования воздушной разведки: “…было бы несправедливо пренебрегать таким средством, с помощью которого является возможным раскрывать силы противника, определять расположение атакуемой крепости и пр. …” 18 декабря того же года приказом военного министра была создана “Комиссия по применению воздухоплавания к военным целям”. А в следующем 1870 г. ей был передан аэростат, построенный на российском заводе, и в Усть-Ижорском саперном лагере начались исследования способов разведки, корректировки артиллерийского огня и решения других задач военного применения аэростатов.

В 1885 г. создается первая в России “Кадровая воздухоплавательная команда”, в дальнейшем преобразованная в “Учебный воздухоплавательный парк”. Первым командиром команды был Александр Матвеевич Кованько. Он же в следующем 1886 г. выполнил первую успешную фотосъемку с воздушного шара в свободном полете от Санкт-Петербурга до Кронштадта.

В начале XX в. в России уже были сформированы разведывательные воздухоплавательные части и созданы аэростатонесущие корабли. В годы Русско-Японской войны (1904–1905 гг.) они получили первое боевое применение: по снимкам составлялись схемы укрепленных деревень и поселков; были вскрыты искусственные препятствия и переправы через озера; контролировалось передвижение войск противника; в осажденном Порт-Артуре корректировался огонь 12-дюймо-

[1] Л.М. Матиясевич – автор указанной книги – по просьбе редколлегии журнала знакомит читателей с кратким содержанием этого интересного издания: 159 страниц познавательного текста, проиллюстрированного 130 фотографиями и рисунками. Книга выпущена в свет в августе 2011 г. издательством “Полигон–Пресс”. Тир. 5000 экз.

вых орудий броненосцев, что позволило подавить артиллерийские позиции противника.

Это еще была не аэрофоторазведка в современном понимании, но русская армия накопила большой организационный и практический опыт воздушной разведки и фотосъемки в боевых условиях.

Успехи в развитии воздухоплавания стимулировали поиск путей преодоления главного недостатка аэростатов – неуправляемости полета. Начинается всеобщее увлечение конструированием дирижаблей – аэростатов обтекаемой сигарообразной формы с рулями управления и двигателями.

Достоинства дирижаблей были очевидны: возможность летать куда надо; большая грузоподъемность; дальность полета. Самолеты же летают низко, недалеко, с малым грузом и часто падают. Тем не менее научно-техническая мысль России одна из первых в мире осознала – будущее за самолетом. В 1906 г. (через два года после открытия авиации) русский военный воздухоплаватель А.И. Шадский в журнале "Воздухоплаватель" дает оценку самолету как перспективной боевой машине, строит модели самолетов и проводит с ними опыты. В 1908 г. Главное инженерное управление приходит к выводу: "Хотя самолеты в настоящую минуту еще не делают очень дальних перелетов, не поднимаются на большую высоту и вообще пока не пригодны для военных целей, но в будущем их роль в военном деле должна быть громадна и поэтому, несомненно, они будут введены на снабжение армии". И Инженерное управление немедленно начинает действовать – закупает во Франции двигатели и организует строительство самолетов.

В июне 1909 г. в Петербурге начал работать первый в России самолетостроительный завод "Российского товарищества воздухоплавания".

Далее приводится история создания Воздушного флота России.

В 1904 г. по инициативе князя Льва Кочубея начался сбор добровольных пожертвований на строительство боевых кораблей. Князь, для начала этого дела, сам пожертвовал 10 тыс. руб.

Для сбора добровольных пожертвований и использования их по назначению был создан Особый комитет, который возглавил Великий князь Александр Михайлович, имевший хорошее инженерное и военно-морское образование, вице-адмирал. На счет комитета поступило свыше 16 млн. руб. На эти деньги было построено 19 современных эсминцев и четыре подводные лодки. Комитет публиковал подробный отчет о расходовании пожертвований до каждой копейки. К концу 1909 г. у комитета осталось еще около миллиона рублей, и великий князь решил их использовать на постройку самолетов. Для этого необходимо было получить согласие жертвователей. 12 января 1910 г. он обратился к ним через газету "Новое время".

Обращение получило единодушную поддержку, и комитет подготовил проект решения, которое 19 февраля 1910 г. (по новому стилю) было подписано императором Николаем II и опубликовано в печати.

Таким образом, 19 февраля 1910 г. следует считать датой рождения воздушного флота России, который изначально создавался на частные средства патриотов России.

В прошлом году исполнилось 100 лет со дня этого знаменательного события, однако оно прошло у нас как-то незаметно.

Между тем уже через два года – в 1912 г. – Россия вышла на второе (после Франции) место в мире по количеству летчиков и самолетов.

Применение самолетов требовало автоматизации фотоаппаратуры. Эта задача впервые в мире была решена подполковником русской армии В. Потте. Разработанный им полуавтоматический фотоаппарат в сентябре 1913 г. поступил на снабжение русской армии.

Таким образом, были созданы необходимые средства для выполнения аэрофоторазведки. Именно в эти годы вошли в обиход термины "аэрофотосъемка", "аэрофоторазведка". Эту дату предлагается считать началом аэрофоторазведки, аэрофотосъемки, и в 2013 г. отметить ее столетие.

К началу Первой мировой войны (1 августа 1914 г.) Россия имела семь самолетостроительных и два моторостроительных завода.

В годы Первой мировой войны воздушная разведка была одной из основных задач авиации. С переходом к позиционному периоду войны ни одна значительная операция по прорыву обороны противника не могла быть успешной без детального изучения материалов аэрофоторазведки. Блестящим примером этого является Брусиловский прорыв (Юго-Западный фронт, 1916 г.).

Россия первой из воюющих стран начала создавать подразделения бомбардировочной и истребительной авиации. Но все бомбардировщики и истребители оснащались аэрофотоаппаратом и наряду со своей основной задачей вели аэрофоторазведку.

Уникальным явлением Первой мировой войны является создание эскадры тяжелых воздушных кораблей "Илья Муромец". Ни одна армия мира не имела подобных самолетов и таких организационных форм применения авиации. Еще в январе 1914 г. на этом самолете был установлен ряд рекордов, он стал выпускаться серийно, а с начала войны завод перешел на трехсменную работу. Создание такого самолета было выдающимся достижением конструкторской мысли и труда самолетостроителей.

Конструктором и организатором производства самолетов "Илья Муромец" был Игорь Иванович

Сикорский, человек непростой судьбы, величайшей целеустремленности и трудолюбия, на века вписавший свое имя в золотой фонд истории отечественной и мировой авиации. Его девизом было: строить самолеты и летать на них.

Эскадра самолетов "Илья Муромец" внесла значительный вклад в развитие аэрофоторазведки и явилась основоположником фотоконтроля боевых действий авиацией.

Другим важным достижением Воздушного флота России явилось издание книги "Ефрейтор Тихов Г.А. Улучшение фотографической и визуальной разведки. Киев: Центральная аэронавигационная станция, 1917 г.". Это первая в мире теоретическая работа, положившая начало аэрофотографии как научно-технической дисциплины. Основанная на анализе тысяч разведывательных аэрофотоснимков и глубоких знаниях автора она определила основные направления совершенствования средств и способов аэрофоторазведки, не утративших своего значения до наших дней.

Авиация русской армии выполнила свыше 30 тыс. самолетовылетов на разведку, изготовила около пяти миллионов аэрофотоснимков. Был накоплен большой опыт организации аэрофоторазведки и использования ее материалов в войсках. В годы войны решались следующие задачи:

– разведка войск и коммуникаций противника;

– фотосъемка, дешифрирование и использование в войсках аэрофотоснимков полевой обороны противника;

– корректировка артиллерийского огня;

– аэрофотосъемка своих войск с целью проверки качества маскировки;

– контроль результатов бомбометания.

II. От Первой мировой до Великой Отечественной войны

Когда в Красной Армии еще служили участники Первой мировой войны, имевшие опыт аэрофоторазведки, ей придавалось большое значение. Так, уже в 1918 г. была создана Высшая аэрофотограмметрическая школа Красной Армии. Однако впоследствии у руководства Красной Армии утвердилось мнение о неперспективности аэрофоторазведки в будущей войне. Это проявилось, в частности, и в реформировании школы: Высшая аэрофотограмметрическая школа – Высшая школа вспомогательных служб – Московская школа спецслужб. Но главными последствиями этого ошибочного мнения было то, что в Красной Армии не готовили специалистов аэрофоторазведки высшей квалификации и, что имело особенно тяжелые последствия, не обучали должным образом общевойсковых командиров и военноначальников методам использования материалов аэрофоторазведки.

К нашему счастью, иначе обстояло дело с аэрофотосъемкой для решения различных н.-х. задач и, в первую очередь, – составления топографических карт. Для решения последней задачи необходимо было решить еще много теоретических, технических и организационных проблем. Сторонники классических геодезических методов не верили в возможность создания точных топографических карт по материалам аэрофотосъемки. Главное геодезическое управление не поддерживало и не финансировало эти работы. Инициатива развития аэрометодов исходила от общественных организаций "Добролета" и "Укрвоздух-пути".

Определенный перелом в развитии аэрофотометодов произошел в 1929 г., когда в Ленинграде был создан НИИ Аэрофотосъемки. Состоялось Всесоюзное совещание по аэросъемке, выступая на котором, академик А.И. Ферсман сказал: "В основе аэрофотосъемного производства лежит глубокая идея, которая пока еще не является общепризнанной, идея огромного н.-х. значения аэросъемки для СССР как метода хозяйственного овладения территорией".

В том же году Московский геодезический институт (впоследствии Московский институт инженеров геодезии аэрофотосъемки и картографии – МИИГАиК, недавно отметивший свое 230-летие) выпустил первую группу инженеров-фотогеодезистов, сыгравших значительную роль в дальнейшем развитии аэрометодов. Карты нужны были и военным, поэтому в тесном контакте с гражданскими специалистами работали и военные топографы. Наряду с научными и производственными организациями в этом процессе активно участвовали МИИГАиК и Военно-инженерная академия им. Куйбышева.

Несмотря на отсутствие мощной государственной поддержки и высказывавшиеся сомнения в самой возможности создания топографических карт аэрометодами, проблема была решена, аэрометоды стали основой картографирования страны.

Другим заметным событием этого периода является открытие нового вида аэрофотосъемки – щелевой. Сегодня он применяется во всех оптико-электронных съемочных аппаратах, использующих в качестве приемника излучения ПЗС-линейки.

Автор изобретения (заявлено 25.10.1936 г.) Виталий Семенович Семенов окончил гимназию с золотой медалью, а в 1925 г. в Ленинграде в Институте инженеров путей сообщения защитил дипломную работу на тему "Аэрофотосъемка".

В.С. Семенов проявил исключительную настойчивость в совершенствовании щелевого фотоаппарата, сопровождал его промышленный выпуск, обучал летный состав выполнению съемки щелевым аппаратом, выполнил в годы войны

свыше 40 боевых вылетов на аэрофоторазведку со щелевым аэрофотоаппаратом.

В целом предвоенный период характеризуется активным развитием аэрофотосъемки для гражданских целей, хорошо поставленным высшим образованием в этой области и забвением аэрофоторазведки. О ней вспомнили лишь в ходе войны с Финляндией, когда попытка прорыва долговременной полевой обороны (линии Маннергейма) после артподготовки, проводившейся путем стрельбы по площадям, оказалась безуспешной, а наши войска понесли тяжелые потери. Стало ясно: необходимы точные данные о системе обороны. С целью получения этих данных была произведена аэрофотосъемка обороны на всю глубину. Для дешифрирования материалов съемки был создан фотограмметрический центр, к работе в котором привлекли лучших специалистов аэрофотослужбы, военных топографов, артиллеристов, специалистов инженерных войск. В результате было определено точное месторасположение всех важнейших элементов обороны (долговременные огневые точки, сектора их обстрела, искусственные препятствия и другие объекты). Спланированная на основе этих данных наступательная операция завершилась прорывом обороны. 12 марта 1940 г. война была закончена.

Таким образом, для того, чтобы вспомнить роль аэрофоторазведки на войне, потребовался жестокий урок, оплаченный жизнями красноармейцев и командиров. Соотношение потерь с финской и нашей стороны составило 1 : 6. Маршалу Советского Союза Тимошенко за эту операцию было присвоено звание Героя Советского Союза.

III. Великая Отечественная война

Этот раздел является наиболее полным и достоверным рассказом об истории аэрофоторазведки в годы войны.

В процессе аэрофоторазведки участвуют три группы специалистов: механики и техники по фотооборудованию; экипажи разведывательных самолетов; специалисты аэрофотрослужбы – фотолаборанты и фотограмметристы-дешифровщики. Организуют и обеспечивают ее выполнение начальники аэрофотослужбы и инженеры по фотооборудованию. Постоянное планомерное осуществление аэрофоторазведки невозможно без участия всех перечисленных специалистов.

В довоенные годы младшие и средние специалисты аэрофоторазведки готовились в Московской школе спецслужб; экипажи разведывательных самолетов, начальники аэрофотослужбы и инженеры по фотооборудованию вообще не готовились.

Накануне войны из Московской школы спецслужб выделилось Гомельское училище аэрофотослужбы, выпускавшее механиков и техников, фотолаборантов и фотограмметристов-дешифровщиков. В начале войны оно перебазировалось на восток в г. Давлеканово, где в 1942 г. в него влилось Таганрогское авиаучилище. На базе этих двух училищ было создано Военно-авиационное училище разведчиков (ВАУР), которое кроме фотоспециалистов стало готовить экипажи разведывательных самолетов.

Проблему подготовки инженеров по фотооборудованию удалось решить благодаря тому, что теория, средства и методы гражданской аэрофотосъемки и аэрофоторазведки аналогичны. Было решено в сжатые сроки дать необходимые военные и технические знания студентам старших курсов МИИГАиКа в Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского. В течение 1941–1942 гг. в академии прошли обучение 57 студентов института. В годы войны они сыграли важную роль в применении и развитии аэрофоторазведки – работали инженерами по фотооборудованию отдельных разведывательных авиаполков и воздушных армий, научными сотрудниками Государственного краснознаменного научно-испытательного института Военно-воздушных сил Красной Армии (ГКНИ ВВС), преподавателями авиаучилища разведчиков, военными представителями на заводах оборонной промышленности.

Некоторое представление об общей организации аэрофоторазведки в годы Великой Отечественной войны дает работа старшего инженера-инспектора Воздушной Армии по фотооборудованию, во многом отличавшаяся от работы старших инженеров-инспекторов других специальностей (самолеты, двигатели, авиавооружение и др.).

Инженер по фотооборудованию, будучи подчиненным главного инженера Воздушной Армии, работал в тесном контакте с разведотделом (прежде всего с начальником аэрофотослужбы армии) и взаимодействовал непосредственно с начальником аэрофотослужбы ВВС КА. Получал от последнего методические и информационные материалы, а также представлял ему ежемесячные отчеты. В отчетах отражалось: число оборудованных аэрофотоустановками самолетов по родам авиации; количество аппаратов по типам; количество вылетов на аэрофоторазведку; число отснятых кадров; число отказов фотоаппаратов; типичные отказы; вновь разработанные фотоустановки; применение новых способов аэрофоторазведки; боевые потери фотоаппаратов.

Эти отчеты позволяли начальнику аэрофотослужбы ВВС КА организовывать обмен опытом между воздушными армиями, корректировать работу сотрудников ГКНИ ВВС, промышленности, выпускавшей аэрофотоаппаратуру, и преподавателей ВАУР.

Кроме главной обязанности любого инженера-инспектора – обеспечения постоянной боеготовности и безотказной работы технических средств, за которые он отвечает, – важнейшей задачей инженера по фотооборудованию была разработка фотоустановок и оборудование ими самолетов: бомбардировщиков, истребителей и штурмовиков. В годы Первой мировой войны все самолеты – бомбардировщики и истребители – имели штатные заводские аэрофотоустановки и аэрофотоаппараты; у нас заводскую фотоустановку имел только самолет-разведчик Пе-2.

В книге описаны:

– содержание работ механиков и техников по фотооборудованию, фотолаборантов и фотограмметристов-дешифровщиков, встречавщиеся при этом трудности и проблемы;

– особенности работы экипажей разведывательных самолетов при выполнении визуальной разведки, дневного и ночного фотографирования;

– особо рассмотрены способы фотоконтроля боевых действий бомбардировщиков и штурмовиков;

– задачи аэрофоторазведки, решаемые в интересах ВВС, артиллерии, бронетанковых и сухопутных войск.

В результате хорошо скоординированной работы на фронте и в тылу были: созданы аэрофотоустановки для всех состоящих на вооружении самолетов; освоено фотографирование со всех высот от 30 до 8000 м; разработаны спаренные, строенные и автоматические качающиеся аэрофотоустановки, обеспечивавшие существенное увеличение ширины полосы местности, фотографируемой за один заход самолета; освоено и получило широкое применение ночное воздушное фотографирование; разработан и применен новый способ перспективно-панорамной съемки с малых высот в интересах бронетанковых войск; разработаны и освоены различные способы фотоконтроля результатов боевых действий авиации; созданы новые фотоаппараты АФА-ИМ, АФА-33, НАФА-13, НАФА-3С.

В итоге в 1944–1945 гг. ВВС могли выполнять любые заявки на аэрофоторазведку. Был накоплен определенный положительный опыт применения материалов аэрофоторазведки, однако не всегда и не везде они должным образом использовались. Причина такого положения дел – этому в свое время не учили. Обучить многотысячный командный и начальствующий состав ВС в годы войны было невозможно, а не все способны самообучаться. Наиболее яркий пример этому Берлинская операция.

Выдающаяся роль в развитии аэрофоторазведки в годы Великой Отечественной войны принадлежит начальнику аэрофотослужбы ВВС полковнику, а затем генералу Геннадию Дмитриевичу Баньковскому. В 1923 г. он окончил Высшую аэрофотограмметрическую школу; в 30-е годы прошлого века изучил большое количество аэрофотоснимков периода Первой мировой войны и составил таблицы типовых масштабов съемки при разведке различных объектов, руководил дешифрированием аэрофотоснимков линии Маннергейма.

Высокий уровень профессиональных знаний, хорошие организаторские способности и активная жизненная позиция Г.Д. Баньковского позволили ему в условиях военного времени преодолеть недоработки довоенных лет, организовать работу и успешно руководить многочисленными коллективами на фронте и в тылу, добиться неуклонного роста роли аэрофоторазведки в общем комплексе боевых действий ВВС.

IV. Послевоенный период

В первые годы после окончания Великой Отечественной войны, в значительной степени по инициативе Г.Д. Баньковского, развернулись работы по развитию аэрофоторазведки с учетом опыта войны и уроков предвоенного периода.

Промышленность разрабатывала новые длиннофокусные объективы; новые черно-белые, цветные, спектрозональные и инфракрасные аэрофотопленки; на смену самолету Пе-2 пришел прекрасный самолет-разведчик Ил-28, фотооборудование которого позволяло за один заход сфотографировать сразу четыре маршрута и т.д.

Группа слушателей, окончивших полный курс обучения на факультете электроспецоборудования Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского, была оставлена еще на один год для углубленного изучения основ аэрофоторазведки.

В Военно-воздушной академии (г. Монино) был создан разведывательный факультет, на котором училось много фронтовиков – офицеров-разведчиков, получивших боевой опыт в годы Великой Отечественной войны. На факультете кроме учебной велась большая научно-исследовательская работа.

В книге рассказывается:

– об этих малоизвестных страницах истории Военно-воздушной академии;

– о создании отдела воздушных съемок Государственного НИИ гражданского воздушного флота;

– о работе Управления опытного строительства авиационной техники ВВС (УОСАТ ВВС) по созданию новых средств аэрофоторазведки;

– о первом гражданском задании боевому разведполку.

Однако шли годы, а начатая подготовка кадров высшей квалификации не была продолжена. Подготовленные кадры постепенно выбывали из строя. После смерти Г.Д. Баньковского в ВВС больше не появилось столь яркой личности. Начались годы обычной рутинной службы. Было упущено время перехода к оптико-электронным средствам съемки и цифровым методам обработки материалов съемки.

Не было организовано и обучение общевойсковых офицеров и генералов методам использования материалов аэрофотосъемки.

В книге очень кратко показан наш путь в космос – как, вопреки всему, мы стали первооткрывателями космоса.

Не прост был путь в космос и фоторазведки. Сергей Павлович Королёв хорошо понимал большое значение для обороны страны космической разведки и еще до полета первого спутника дал старт разработке опытных образцов разведывательной аппаратуры. Однако полетел первый, второй, третий спутник, полетели американские спутники, а задания от Министерства обороны на разработку разведывательных спутников не поступало.

В книге рассказывается: о первых шагах микроподразделения, призванного исследовать возможности и пути создания средств и методов космической разведки; о людях ОКБ-1, участвовавших в этих работах; о первых космических фотоснимках; о разведывательной аппаратуре экспериментального разведывательного КК и ее разработчиках; об истории создания первых разведывательных КК – “Зенит-2” и “Зенит-4” и об участии в этом Сергея Павловича Королёва; приведены личные впечатления автора об общении с С.П. Королёвым и мало кому известная, самая краткая, точная и яркая характеристика Сергея Павловича, данная его первым заместителем В.П. Мишиным.

В заключение краткого, но достоверного рассказа о пути нашей аэрофоторазведки в космос приведена общеизвестная но, к сожалению, не волнующая руководство нашей страны информация о широком применении космической видеосъемки во всем мире.

Сегодня в космосе летает множество гражданских космических аппаратов разных стран мира со съемочной аппаратурой, не уступающей по информативности лучшим образцам разведывательной аппаратуры. Образовался международный рынок материалов космической видеосъемки и услуг по их обработке и применению. Возникла конкуренция в этой сфере. Космическая видеосъемка вслед за космической связью стала экономически целесообразной областью космонавтики. Мы же лишь покупаем снимки у других стран.

Эта информация заканчивается призывом к созданию современной конкурентноспособной системы видеосъемки и к участию в этом деле частного капитала.

Заключение книги приведено в виде двух коротких параграфов.

В первом парграфе показаны возможности современных средств аэрокосмической видеоразведки и сделан следующий вывод: огромный опыт практического применения аэрокосмических снимков для решения различных задач, хотим мы того или не хотим, неизбежно приведет к тому, что в современных войнах материалы аэрокосмической съемки в сочетании с надежными средствами связи будут основой:

– планирования боевых действий (боя, сражения, операции);

– управления войсками в ходе боевых действий (боя, сражения, операции);

– целеуказания артиллерии, авиации и ракетным системам;

– планирования и проведения морских и воздушных десантных операций и действий групп наземной войсковой разведки.

Во втором параграфе главным является вывод: наряду с разработкой необходимых технических средств и математического аппарата решения типовых задач, совершенствования планирования разведки необходимо коренным образом изменить обучение общевойсковых офицеров и начальников всех уровней и организовать подготовку разведчиков высшей квалификации (офицер с высшим образованием, кандидат, доктор технических и военных наук).

Без высокообразованных профессиональных кадров мы неизбежно повторим ошибки прошлого, но в современном мире они нам могут обойтись намного дороже, чем прежде.

В книге есть ряд новых положений, требующих обсуждения и реализации.

1. Даты и терминология

1.1. 19 февраля 1910 г. был подписан государственный документ, положивший начало созданию воздушного флота России на добровольные пожертвования граждан. Событие малоизвестное; столетие его в прошлом году на государственном уровне прошло незаметно. Между тем через два года, в 1912 г., Россия вышла на второе место в мире по числу летчиков и самолетов, а к началу Первой мировой войны (1914 г.) имела семь самолетостроительных и два моторостроительных завода.

Есть все основания день 19 февраля отмечать как начало создания воздушного флота России.

1.2. Целесообразно в качестве времени рождения “Аэрофоторазведки”, “Аэрофотосъемки” принять сентябрь 1913 г., когда на снабжение рус-

ской армии поступил первый в мире автоматический аэрофотоаппарат конструкции полковника Потте, появилась возможность выполнения маршрутной и площадной аэрофотосъемки. Соответственно в 2013 г. отметить столетие этого события.

1.3. В 2014 г. необходимо отметить 120-летие со дня рождения начальника аэрофотослужбы ВВС Г.Д. Баньковского, внесшего большой вклад в нашу победу в Великой Отечественной войне.

1.4. Датой первой в нашей стране космической фотосъемки поверхности Земли считать 9 марта 1961 г., когда был получен первый космический фильм с корабля "Восток".

1.5. Датой начала космической разведки в нашей стране считать 26.04.1962 г. – успешный пуск первого экспериментального разведывательного космического корабля с фотографической, фототелевизионной и радиотехнической разведывательной аппаратурой.

1.6. В связи с тем, что с появлением космической разведки аэрофоторазведка не утратила своего значения, а кроме фотографических средств съемки появились оптико-электорнные средства, ввести в обиход термины "Аэрокосмическая видеоразведка" и "Аэрокосмическая видеосъемка".

2. Средства съемки и методы применения материалов аэрокосмической видеоразведки

2.1. Учитывая чрезвычайную важность для экономики нашей страны (экологический мониторинг, кадастр и использование земельного фонда; состояние и эксплуатация лесов; разведка полезных ископаемых; контроль состояния районов интенсивной добычи полезных ресурсов и нефтегазовых трубопроводов; обеспечение навигации по Северному морскому пути и многое другое) принять государственную программу создания системы космических аппаратов с высокоинформативной многозональной цифровой оптико-электронной аппаратурой съемки, для чего использовать государственные средства из числа планируемых на создание новых технологий, и привлечь частный капитал.

2.2. Всесторонне обсудить и принять решение по следующим вопросам:

а) использования материалов аэрокосмической видеоразведки

– при подготовке боевых действий разного масштаба,

– при управлении войсками в ходе боевых действий,

–для целеуказания артиллерии, авиации и ракетным системам,

– при планировании и выполнении воздушных и морских десантных операций и действий групп наземной войсковой разведки;

б) подготовки специалистов воздушной разведки высшей квалификации;

в) обучения общевойсковых офицеров и генералов методам использования материалов аэрокосмической видеоразведки в боевой деятельности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 85–88

ХРОНИКА

ПРОБЛЕМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕМЛИ НА XXXVI КОРОЛЁВСКИХ ЧТЕНИЯХ

© 2012 г. В. В. Зуева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)" ("МАИ"), Инженерно-экономический институт, кафедра "Маркетинг и коммерциализация в аэрокосмической промышленности", Москва

E-mail: zuevavv@inbox.ru

Поступила в редакцию 02.02.2012 г.

Представлены основные направления космической деятельности, обсуждавшиеся в ходе проведения XXXVI Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства.

Ключевые слова: фундаментальные проблемы космонавтики, ракетно-космическая техника, разработка и проектирование космической техники, наукоемкие технологии, аэрокосмическое образование, история космической науки и техники.

В Москве с 24 по 27 января 2012 г. прошли ежегодные XXXVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства "Королёвские чтения". Чтения проводились под эгидой Российской академии наук (РАН), Федерального космического агентства, Комиссии РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства. Вот уже несколько лет Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ) приглашает участников Чтений для работы в пленарных заседаниях, круглых столах, выставках и заседаниях 21 секции.

Председателем оргкомитета и активным его руководителем на протяжении десятилетий был член-корреспондент Академии наук СССР, академик РАН, доктор технических наук Борис Евсеевич Черток. К большому сожалению, Б.Е. Черток ушел из жизни в декабре 2011 г. Тем не менее, руководимые сплоченным коллективом оргкомитета, Чтения прошли в 36-й раз и вызвали неизменный интерес специалистов.

В рамках чтений обсуждались следующие вопросы:

– научное наследие пионеров освоения космического пространства и конструкторские школы ракетно-космической техники;

– фундаментальные проблемы космонавтики и состояние развития отдельных ее направлений;

– место космонавтики в решении вопросов социально-экономического и стратегического развития современного общества;

– гуманитарные аспекты космонавтики;

– особенности проектирования и конструкции летательных аппаратов и двигательных установок;

– прикладная небесная механика и управление движением;

– развитие наукоемких технологий в ракетно-космической технике;

– совершенствование объектов наземной инфраструктуры, систем управления космических аппаратов и комплексов, космической навигации и робототехники;

– достижения и проблемы аэрокосмического образования в России;

– актуальные вопросы космической биологии и медицины;

– исследования по истории космической науки и техники.

На протяжении многих лет докладчики Чтений представляют как исторические исследования значительных событий отечественной космонавтики, творческих и профессиональных достижений ученых – пионеров освоения космического пространства, так и результаты исследований и разработок широкого спектра научных знаний, призванных обеспечить развитие освоения космического пространства в настоящее время.

Активное участие в работе секций принимают специалисты предприятий отрасли и сотрудники

высших учебных заведений России. Среди предприятий и вузов, чьи представители активно участвуют в работе Королёвских Чтений, – ОАО РКК "Энергия" им. С.П. Королёва, Отдельное конструкторское бюро Московского энергетического института (ОКБ МЭИ), Московский авиационный институт (МАИ, НИУ), Военная Академия воздушно-космической обороны (г. Тверь), ОАО ВПК НПО Машиностроения, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, ФГУП ГНП РКЦ ЦСКБ "Прогресс" (г. Самара), ГНЦ ФГУП "Исследовательский центр имени М.В. Келдыша", Самарский Государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва, ФГУП Научно-производственное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом им. А.Г. Иосифьяна (ФГУП НПП ВНИИЭМ), Институт мировой экономики и международных отношений РАН (ФГБУН ИМЭМО РАН), ФГУП КБ "Арсенал" (г. Санкт-Петербург), Днепропетровский национальный университет (Украина, г. Днепропетровск) и другие.

Королёвские Чтения призваны демонстрировать развитие знаний, науки и техники в деле освоения космического пространства и использования достижений этого освоения на благо человечества. Большая часть докладов посвящена развитию техники и технологий, в том числе, направленных на исследования Земли из космоса.

Так, на 4-й секции был представлен доклад А.В. Горбунова, В.М. Мурашко, В.Н. Галайко и др. (ФГУП НПП ВНИЭМ, г. Москва; ФГУП ОКБ "Факел", г. Калининград; ОАО НПЦ "Полюс", г. Томск) "Корректирующая двигательная установка МКА ДЗ "Канопус-В".

На 13-ю секцию были представлены тезисы А.И. Калякина (ФГУП ГНП РКЦ ЦСКБ "Прогресс", г. Самара) "Рационализация планирования бортовым комплексом управления работы целевой аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондировании земли", а на 18-ю секцию – С.Ю. Самойлова (ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина", г. Химки) "Разработка методики привязки снимков, полученных с космических аппаратов, к земной поверхности".

Но, пожалуй, наибольшее количество докладов, посвященных исследованиям Земли с помощью космических средств, было представлено на 8-й секции "Экономика космической деятельности". Руководителями этой секции много лет являются академик Международной академии астронавтики, заведующий кафедрой 509 Инженерно-экономического института МАИ (ИНЖЭКИН МАИ) к.э.н. С.С. Корунов и летчик-космонавт СССР, Дважды Герой Советского Союза, депутат Государственной Думы РФ, к.т.н. С.Е. Савицкая.

Всего для участия в работе секции были приняты 26 докладов от представителей различных организаций г. Москвы и г. Санкт-Петербурга. Секция работала один день, 25.01.2012 г. В ее работе приняло участие более 40 человек, которые не только заслушали докладчиков, но и проявили живой интерес к обсуждению представленных тем. Среди докладчиков и слушателей присутствовали представители Роскосмоса, предприятий отрасли, научно-исследовательских и учебных институтов, а также студенты и аспиранты кафедры 509 "Маркетинг и коммерциализация в аэрокосмической промышленности" ИНЖЭКИН МАИ. Ряд докладов был посвящен проблемам формирования концепции развития отрасли на перспективу и особенностям управления экономическими субъектами в условиях нестабильности и необходимости инноваций, докладчики: М.А. Бек, Н.Н. Бек (Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ)); В.В. Василевский (ИНЖЭКИН МАИ); С.В. Володин (ИНЖЭКИН МАИ); В.С. Дубчак (Московский институт управления (МИУ)); А.Н. Куриленко (ФГУП "Организация "Агат"); Л.В. Панкова (ИМЭМО РАН); Г.Н. Белова (ИНЖЭКИН МАИ). Докладчиками неоднократно отмечалось, что в настоящее время космические исследования чрезвычайно важны для страны. Предприятия космической отрасли обладают высоким научно-техническим и инновационным потенциалом, надо только грамотно им распорядиться в условиях, когда перед всеми отраслями национального хозяйства стоят задачи выхода на инновационные пути развития, совершенствования технологий и проектов с целью максимального удовлетворения требований потребителя в условиях обострения конкурентной борьбы на рынке космических услуг, во всех его сегментах.

Кроме того, были сделаны доклады, представляющие результаты исследований по повышению эффективности функционирования различных прикладных космических комплексов и систем. В докладах А.А. Кисиленко и Н.А. Никоновой (ИНЖЭКИН МАИ) объектом рассмотрения явилась навигационная система ГЛОНАСС. Работа Е.С. Шишовой (ФГУП "Организация "Агат") направлена на оптимизацию программы технологических исследований на автоматических космических аппаратах. Проблемы и некоторые их решения двойного использования серийных космических комплексов были представлены М.И. Кислицким (ФГУП КБ "Арсенал").

Традиционно большое количество докладов и выступлений было связано с развитием систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В работе О.А. Давидюк (ОАО НПК "Рекорд", г. Москва) "Инвестиции в сферу высоких технологий и их риски" рассматриваются проблемы инвестиций в

ракетно-космическую отрасль. Отмечается, что использование технологий ДЗЗ, как предмета инвестиционной деятельности предприятия, сопряжено с трудностями, которые могут быть объединены в две группы: 1) несовершенство существующих методических подходов к оценке эффективности реализации инвестиционных проектов, проводимых для внедрения технологий ДЗЗ; 2) несовершенство существующего законодательства, регулирующего порядок использования технологий ДЗЗ для нужд с.-х., а также в интересах проведения экологического мониторинга окружающей среды.

В качестве рекомендаций докладчиком предложено скорейшее урегулирование и решение следующих проблемных вопросов отсутствия в действующих руководящих документах, регулирующих порядок оценки эффективности инвестиционных проектов, методов определения дохода от реализации проектов и мероприятий, выполняемых для государственных нужд и отсутствия статистической информации по практической реализации технологий ДЗЗ в отечественной практике проведения природоохранных мероприятий и в экономике народного хозяйства, что делает невозможным использование экстраполяционно-статистических методов прогнозирования для оценки предстоящих затрат и доходов.

В докладе аспиранта ИНЖЭКИН МАИ Е.К. Колецкой “Анализ потребностей отраслей народного хозяйства в использовании результатов ДЗЗ” дана общая характеристика систем исследования Земли из космоса и направлений использования результатов таких исследований, были предложены результаты работы по анализу потребностей различных отраслей народного хозяйства в использовании результатов ДЗЗ, а именно: анализ и оценка возможности развития космических систем ДЗЗ; оценка использования традиционных средств решения задач ДЗЗ; исследование и прогнозирование рынка услуг ДЗЗ в различных отраслях н.-х.

Все докладчики неоднократно отмечали важность применения исследований Земли с помощью космических средств, однако в существующих условиях рыночной экономики недостаточно только наличие технической возможности проведения таких исследований. Все большее значение при разработке, производстве и эксплуатации космической техники приобретают маркетинговые исследования и обоснование коммерческой эффективности космических систем. Космические комплексы, нацеленные на изучение Земли, в этой тенденции не исключение. Круг пользователей информации, получаемой с помощью таких средств, в последнее время значительно расширился. Информация из космоса используется не только в фундаментальной науке, военными или специалистами в области геологии, но и широким кругом пользователей, включающим не только государственные, но и коммерческие предприятия и частных пользователей. Причем возможности применения результатов исследований из космоса настолько широки, что при грамотном подходе они могут принести предприятиям и государству значительную прибыль не только в виде условных социальных, научных, инновационных и прочих эффектов, но и вполне ощутимый финансовый результат. Для того чтобы эти исследования вышли на новый уровень эффективности, предприятиям, осуществляющим разработку, производство и эксплуатацию космических комплексов исследования Земли, необходимо изменить сам подход к процессу проектирования и продвижения своей техники на рынке космических услуг. Первичным при обосновании создания и модернизации космического комплекса должен стать потенциальный покупатель его услуг, а не технические идеи создателя, будь то транспортная космическая система, система связи, навигации или исследования Земли.

Этот тезис из доклада Е.Н. Соколовой, В.В. Зуевой “Влияние потребительских предпочтений на экономическую эффективность космических комплексов ДЗЗ” вызвал оживленную дискуссию. Представители ракетно-космической отрасли справедливо отмечали, что при создании космических комплексов ДЗЗ проводятся различные исследования и обоснования направлений использования, проектируемых систем, однако признали, что в первую очередь создатель идет от тех технических решений и возможностей, которые имеет. Эта ситуация понятна и привычна для отрасли, но в современных условиях обострения конкурентной борьбы на рынке космических услуг, расширения его за счет иностранных предложений и все расширяющегося круга хорошо информированных (благодаря современным информационным технологиям), требовательных потенциальных потребителей маркетинговым исследованиям необходимо уделять гораздо больше внимания. Косвенно данный тезис докладчиков был подтвержден и летчиком-космонавтом, президентом Московского государственного университета геодезии и картографии (МГУГК (МИИГАиК)) В.П. Савиных в его интервью на утреннем канале Российского телевидения “Утро России”, в котором он упомянул, что возможности существующей российской системы не отвечают требованиям, по крайней мере, картографов и геодезистов, что привело к тому, что крупнейший заказ по картографированию территории Москвы будет выполнен с помощью американской спутниковой системы (не бесплатно, конечно) (http://www.gisa.ru/82969.html).

Свои предложения по формированию комплексного коммерческого предложения для про-

движения проекта космических комплексов ДЗЗ на зарубежные рынки выдвинул представитель ФГУП КБ "Арсенал" О.В. Манойлов.

Одним из направлений развития космических систем ДЗЗ представитель ФГУП "Организация "Агат" Н.В. Рысаева видит развитие государственно-частного партнерства (ГЧП) как перспективной формы взаимодействия между государством и частным сектором. Примеры эффективного взаимодействия государства и рынка, отработанные в США, позволяют предположить актуальность и осуществимость ГЧП в нашей стране в период недостаточности бюджетного финансирования.

В целом работа секции была достаточно интенсивной, с большим количеством вопросов и обсуждений наболевших тем. При этом необходимо отметить доброжелательную атмосферу, сопровождающую работу данной секции Чтений на протяжении более чем десятилетия.

По материалам выступлений руководством секции был подготовлен отчет, в котором отражены наиболее важные и интересные вопросы, поднимавшиеся в ходе докладов и дискуссий, а также рекомендации по их решению. Отчет будет передан в Оргкомитет Королёвских Чтений, который сформирует общий отчет и рекомендации для РАН, РФФИ, других заинтересованных организаций и ведомств.

Участники Чтений получили колоссальный опыт не только публичных выступлений, но и непосредственного общения, обменялись контактами в целях дальнейших исследований, сотрудничества и обмена мнениями.

По мнению не только руководства секции, но и всех участников, ее работа позволила различным специалистам представить результаты своей деятельности, ознакомиться с направлениями научных исследований в этой области, ведущимися в различных учреждениях страны. Проведение научных Чтений, несомненно, полезно не только для повышения квалификации специалистов, принимающих в них участие, но и для их предприятий и учебных заведений, и в целом для страны, стремящейся к инновациям и развитию.

The Problems and Results of Space Researches of the Earth on XXXVI Academic Conference on Astronautics Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev

V. V. Zueva

Moscow Aviation Institute (State University of Aerospace Technologies), Moscow

In the review the basic directions of space activity discussed during carrying out XXXVI Academic Conference on Astronautics, devoted memories of academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists – pioneers of development of a space are presented.

Keywords: fundamental problems of astronautics, the space-rocket techniques, working out and designing of space techniques, high technologies, space-oriented education, history of a space science and techniques

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2012, № 4, с. 89–91

ХРОНИКА

ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ “ПЕРСПЕКТИВЫ ЧЕРНОГО МОРЯ”

© 2012 г. М. И. Митягина

Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

E-mail: mityag@mx.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.01.2012 г.

Статья посвящена обзору основных результатов научных исследований, представленных на третьей международной научной конференции “Перспективы Черного моря”. Основной целью конференции является координация усилий ученых из шести государств, окружающих Черное море, направленных на использование науки и информационных технологий для выявления наиболее острых экологических проблем Черного моря и нахождения путей их решения.

Ключевые слова: международная научная конференция, дистанционное зондирование, спутниковый мониторинг, информационные технологии, экологические проблемы, Черное море

В начале ноября 2011 г. состоялась Третья международная конференция, посвященная изучению Черного моря. Удачно выбранное англоязычное название конференции “Black Sea Outlook” объединяет и взгляд, и точку зрения, и наблюдение, и перспективное направление. В переводе на русский язык конференцию уместно назвать “Перспективы Черного моря”. Конференция проводится один раз в два года. Впервые конференция состоялась в Турции в 2006 г., второй раз ученые собрались на встречу в 2008 г. в Болгарии, в Софии, а страной проведения Третьей конференции стала Украина. Конференция проходила в Одессе, непосредственным местом ее проведения послужил расположенный в историческом центре города отель “Бристоль”, построенный на рубеже XIX–XX вв., – историческая достопримечательность и визитная карточка Одессы.

Конференция проводилась под эгидой комиссии по защите Черного моря от загрязнения – Черноморской комиссии (The Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution – the Black Sea Commission). Непосредственную организацию и проведение конференции осуществлял Украинский научный центр экологии моря (УкрНЦЭМ), созданный в 1992 г. на базе Одесского отделения Государственного океанографического института, при поддержке Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Украины.

Основная цель конференции – координация усилий ученых из шести государств, окружающих Черное море, направленных на использование науки и информационных технологий для выявления наиболее острых экологических проблем Черного моря и нахождения путей их решения. Конференция призвана внести свой вклад в укрепление регионального сотрудничества в целях сохранения экосистемы Черного моря как ценного природного дара и в обеспечение устойчивого использования его морских и прибрежных ресурсов для экономического развития региона, безопасности и процветания его населения.

Научная тематика Конференции отличалась широтой и отражала современные проблемы в области геофизических, биологических, экологических исследований Черного моря, а также проблемы сбора и хранения информации и контроля их качества, организации обмена научными данными. Необходимо подчеркнуть, что большое количество интересных научных результатов, представленных на конференции, получено с помощью интенсивно развивающихся спутниковых дистанционных методов исследования природных сред.

В Конференции приняли участие более 200 участников из 10 стран. Работа проводилась в рамках шести секций.

В рамках 1-й секции обсуждались вопросы, связанные с нефтяным загрязнением и эвтрофикацией Черного моря.

Экосистема Черного моря сильно подвержена нефтяному загрязнению, эвтрофикации вод (процесс ухудшения качества воды из-за избыточного поступления в водоем биогенных элементов) и внедрению агрессивных видов. Увеличение танкерных перевозок нефти в Черном море, в основном связанных с увеличением экспорта из России и Каспийского региона, является предметом большого беспокойства (кроме загрязнения существу-

ет все в большей мере возрастающая загруженность узкого пролива Босфор и возросшая перспектива аварий). Использование спутникового наблюдения для мониторинга нефтяного загрязнения, оценки масштабов, прогнозов распространения и выявления источников загрязнения является темой многих исследований и пилотных проектов, представленных в рамках этой секции. В решениях Конференции и в отчете Черноморской комиссии в качестве одного из приоритетов установлена необходимость разработки и применения новых методов спутникового мониторинга в регионе, а также создания региональных моделей распространения поверхностных загрязнений. После принятия соответствующих законодательных актов результаты космических измерений могут быть признаны в качестве доказательств экологической экспертизы. В связи с этим важное значение имеет степень достоверности интерпретации спутниковых данных в целях извлечения информации об антропогенном загрязнении морской поверхности.

На заседаниях 2-й секции обсуждались вопросы систем сбора и хранения данных, проблемы обмена, контроля качества созданных баз данных, а также обеспечения пользователей этими данными и информационной поддержки систем принятия решений. Представлены работы по созданию баз данных о состоянии природной среды: данных по метеорологии, гидрологии, океанографии, загрязнению и некоторым другим видам наблюдений, связанным с природной средой. В ряде представленных докладов отражена деятельность в рамках международных проектов UBSS, SeaDataNet, MONINFO, EMODNET, CASPINFO, GEO-SEAS, ENVIROGRIDS, PEGASO.

В рамках 3-й секции обсуждались вопросы оценки влияния промышленного развития на экологию региона. В докладах приводились примеры как экологически безопасных, так и неустойчивых методов использования морских ресурсов. Оценивались нагрузки на экосистему, обусловленные освоением природных ресурсов, развитием нефтегазовой промышленности, обсуждались вопросы внедрения альтернативных источников энергии. Отмечено, что в связи с изменением геополитической обстановки значение прибрежных районов Черного моря многократно возрастает. Это выражается в значительном росте капиталовложений в реконструкцию и строительство портового хозяйства и терминалов по перевалке нефтепродуктов и т.п. Осваиваются новые территории под строительство объектов рекреации и морского туризма. В то же время многие текущие и долгосрочные проекты освоения и использования природных ресурсов разрабатываются без должного учета приоритетных направлений. Зачастую не учитываются допустимые нагрузки на экосистему береговой зоны моря, а также последствия тех или иных видов хозяйственной деятельности. Не всегда принимаются меры по сохранению и воспроизводству природных ресурсов прибрежно-морских зон.

На 4-й секции были заслушаны доклады об исследования в области литодинамических процессов береговой зоны моря. В частности, представлены оценки современного состояния морских берегов Кавказского побережья и возможности их защиты искусственными пляжами, деградации песчаных пляжей северо-восточной части Черного моря в связи с дефицитом наносов и антропогенным воздействием. Современное состояние берегов Черного моря в целом можно охарактеризовать как неудовлетворительное. В настоящее время значительная часть берегов Черного моря подвержена абразионно-оползневым процессам. Создавшееся положение усугубляет проблему абразии и размыва морских берегов. Общее истощение пляжей или их отсутствие сдерживает курортное строительство. Перечисленный комплекс опасных природных и антропогенных процессов требует принятия неотложных мер по защите берегов Черного моря.

Работы, представленные в рамках 5-й секции, были посвящены проблемам климатических изменений. Отмечено, что в последние десятилетия в Черноморском регионе наблюдались особенно резкие тренды увеличения термического фона, смены атмосферного режима, ослабления ветровой активности. Увеличился приток пресных вод вследствие роста осадков и уменьшения испарения. Климатические изменения в регионе Черного моря обусловлены не только антропогенным глобальным потеплением, но и естественными вариациями параметров климатической системы. Изменения климатических условий вызывают изменение циркуляции воды в бассейне Черного моря. Из-за потепления и ослабления ветров мощное круговое течение сменяется отдельными небольшими по размеру вихрями, которые перемешивают прибрежную зону, “вентилируют” ее и перераспределяют загрязнения.

В рамках 6-й секции представлены работы по биологии Черного моря и изменению видового состава фауны. Отмечено, что для моря очень остро стоит проблема инвазивных видов. Сейчас в Черном море биологи насчитывают 138 инвазивных видов, среди которых есть как планктонные виды, так и обитатели дна, рыбы и прочие.

Конференция проводилась с 1 по 4 ноября 2011 г. День, предшествующий началу конференции, – 31 октября – отмечается как Международный день Черного моря. В целях защиты Черного моря от загрязнения и других негативных последствий 21 апреля 1992 г. шесть причерноморских стран – Болгария, Румыния, Турция, Грузия, Россия и Украина – подписали Конвенцию о защите

Черного моря от загрязнения (Бухарестская конвенция), которая была ратифицирован всеми подписавшими ее в 1994 г. Для эффективного выполнения Бухарестской конвенции 31 октября 1996 г. государства-члены приняли Стратегический план действий по реабилитации и защите Черного моря, который был разработан после проведения всесторонних исследований морской среды, показавших, что ее жизнеспособность существенно ухудшилась в сравнении с предыдущими тремя десятилетиями. Эта дата с тех пор отмечается как Международный день Черного моря и уже твердо заняла свое место в календаре, напоминая о событии, связанном с повышением экологической осведомленности и вовлечением общественности в решение проблем Черного моря, формируя общественное мнение в защиту моря, содействие воспитанию экологической культуры населения. Не могли остаться в стороне и участники Конференции. Был проведен круглый стол, в рамках которого прошли дискуссии, посвященные экологическим проблемам Черного моря и поиску путей решения наиболее острых из них.

3rd Bi-Annual International Scientific Conference “Black Sea Outlook”

M. I. Mityagina

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

Main results presented at the 3rd Bi-Annual International Scientific Conference “Black Sea Outlook” are reviewed. The main goal of the conference is to initiate a concerted effort to use science and information technology to understand and deal with the environment problems of the Black Sea, to strengthen science/policy interface and regional cooperation towards better governance of environment protection to preserve the Black Sea ecosystem as a valuable natural endowment of the region.

Keywords: International scientific conference, remote sensing, satellite monitoring, information technology, environment problems, Black Sea