

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.1.048

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ГЛОБАЛЬНЫХ БАЗАХ ДАННЫХ ПО ОСАДКАМ НА ОЦЕНКИ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА СУШИ¹

© 2012 г. О. Н. Насонова

Институт водных проблем Российской академии наук

119333 Москва, ул. Губкина, 3

Поступила в редакцию 15.11.2010 г.

Проведен анализ полученных в рамках международного проекта GSWP-2 результатов моделирования составляющих водного баланса суши с использованием шести альтернативных баз данных по атмосферным осадкам и четырех моделей взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP, NSIP, NOAH и SSiB. Расчеты проводились для всей поверхности суши (за исключением Антарктиды) с одноградусным шагом по пространственной сетке и трехчасовым шагом по времени за 1982–1995 гг. Выявлено, в какой степени неопределенности, связанные с заданием осадков и выбором модели, влияют на результаты моделирования воднобалансовых характеристик.

Ключевые слова: водный баланс суши, глобальные базы данных, модели тепловлагообмена суши с атмосферой, GSWP-2.

На данный момент разработано немало глобальных баз данных по осадкам, различающихся пространственным и временным разрешением, а также степенью надежности и достоверности. Эти различия могут быть связаны, во-первых, с использованием разных источников получения исходной информации (включающих в себя наземные и спутниковые наблюдения, а также модельные расчеты), а во-вторых, с методами обработки этой информации (возможным введением поправок в данные наземных наблюдений; восстановлением неполных рядов наблюдений; комбинированием данных, полученных из разных источников; интерполяцией данных наблюдений в узлы регулярной сетки и т.п.). Цель настоящей работы – выявить, как неопределенности в задании значений осадков, связанные с использованием альтернативных баз данных, могут повлиять на модельные оценки характеристик водного баланса суши.

Работа выполнена на основе анализа результатов модельных расчетов, полученных в процессе участия лаборатории физики почвенных вод ИВП РАН (в том числе и автора) с моделью Soil Water – Atmosphere – Plants (SWAP) в международном глобальном проекте по влажности почвы Second Global Soil Wetness Project (GSWP-2) [11] в рамках всемирной программы по исследованию климата (World Climate Research Programme (WCRP)). По-

лученные результаты частично опубликованы в [7, 8, 18]. Последние две работы посвящены исследованию влияния неопределенностей в исходной метеорологической информации и параметрах подстилающей поверхности на глобальные оценки составляющих теплового и водного балансов суши. Данная работа, являющаяся логическим продолжением [8, 18], посвящена дальнейшему исследованию вопроса о степени влияния неопределенностей в задании осадков на модельные оценки составляющих водного баланса. При этом, помимо результатов расчетов по модели SWAP, будут проанализированы аналогичные результаты, полученные по трем зарубежным моделям.

МЕТОДОЛОГИЯ

Решение поставленной задачи может быть проведено с использованием как одной модели, так и ансамбля моделей, способных адекватно воспроизводить тепловлагообмен суши с атмосферой. В настоящей работе основное внимание уделено анализу результатов расчета составляющих водного баланса всей поверхности суши (за исключением Антарктиды) с помощью модели SWAP [1–4]. Для исследования влияния неопределенностей в заданных значениях осадков на моделируемые характеристики водного баланса расчеты по модели SWAP проводились с использованием шести альтернативных глобальных баз данных по осадкам, в то время как остальные метеорологические элементы и параметры подсти-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-05-00027) и Федерального агентства по науке и инновациям РФ (контракт 02.740.11.0336).

лающей поверхности оставались неизменными. Степень неопределенности в значениях осадков определялась диапазоном различий между ними в используемых базах данных, а в значениях моделируемых характеристик – диапазоном их различий в разных вариантах расчета.

В силу того, что оценки водного баланса зависят не только от используемой информации, но и от методов расчета, полученные закономерности в определенной степени модельно зависимы. Поэтому для подтверждения основных выводов результаты расчетов по модели SWAP были сопоставлены с аналогичными результатами расчетов по трем моделям: NSIPP-Catchment (сокращенно NSIP) [17], NOAA [9] и SSiB [22], участвовавшим в GSWP-2.

Расчеты по всем моделям проводились с 1 июля 1982 по 31 декабря 1995 г. При этом период с 1 июля 1982 по 31 декабря 1985 г. использовался для так называемой раскрутки модели, необходимой для ее инициализации. Обычно для раскрутки применяется метод итерационной прогонки первого расчетного года до достижения состояния квазиравновесного года [5, с. 59]. Очевидно, что квазиравновесный год отличается от реального, поэтому для уменьшения влияния этих отличий на результаты расчетов в проекте GSWP-2 было предложено после достижения квазиравновесного состояния осуществить расчеты еще для последующих 2.5 лет и весь этот период считать периодом раскрутки модели. Полученные на конец этого периода значения нуждающихся в инициализации переменных (например, температуры, влажности и льдистости почвы, глубин ее промерзания или оттаивания, а также снеготазов для каждой расчетной ячейки) принимались в качестве начальных для последующих расчетов. При анализе полученных результатов период раскрутки модели исключался из рассмотрения.

Модели SWAP, NSIP, SSiB и NOAA

Все четыре модели относятся к классу моделей взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой (Land Surface Models (LSMs)). Модели NASA Seasonal-to-Interannual Prediction Project catchment based model (NSIPP-Catchment), Simplified SiB – Simple Biosphere Model (SSiB) и National Centers for Environmental Prediction, Oregon State University, Air Force, Hydrologic Research Lab NWS (NOAH), разработанные в США, хорошо известны. Их описание можно найти, в частности, в [9, 17, 22]. Различные версии модели SWAP, разработанной в лаборатории физики почвенных вод ИВП РАН, детально рассмотрены в ряде отечественных и зарубежных публикаций [1–4, 7, 12–14]. Поскольку в данной работе не преследуется цель сопоставления моделей, не будем останавли-

ваться на их описании, а отметим лишь отличительные особенности этого класса моделей.

Изначально LSM-модели предназначались для сопряжения с моделями общей циркуляции атмосферы и представляли собой простейшие параметризационные схемы. Впоследствии они эволюционировали в независимые, достаточно детальные модели, служащие мощным инструментом для решения самых различных задач в области климатологии, гидрологии, глобальной экологии и т.д. [20].

В отличие от классических гидрологических моделей водосборов, LSM-модели воспроизводят не только водный, но и радиационный и тепловой обмена в системе почва–растительный/снежный покров–приземный слой атмосферы (Soil–Vegetation–Atmosphere System (SVAS)) и имеют большее число входных и выходных переменных. Входная информация для LSM-моделей представляет собой приземные значения метеорологических элементов (приходящих потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, атмосферных осадков, температуры и влажности воздуха, скорости ветра и атмосферного давления) и параметры подстилающей поверхности (характеристики растительного покрова, гидрофизические параметры почвы и топографические характеристики местности). При региональных или глобальных расчетах указанная информация задается для каждой расчетной ячейки сетки, покрывающей рассматриваемую территорию (речной бассейн, континент и т.п.).

Выходных характеристик может быть несколько десятков. Это, в частности, переменные состояния (температура подстилающей поверхности, влажность почвы, снеготазы и т.п.), а также радиационные, тепловые и водные потоки (например, турбулентные потоки скрытого и явного тепла, поток тепла в почву, суммарное испарение и его составляющие, поверхностная и подземная составляющие стока в пределах каждой расчетной ячейки и т.п.). В данной работе будут рассмотрены лишь составляющие водного баланса.

Глобальные базы данных, использованные для модельных расчетов

Глобальные базы данных по геофизическим характеристикам обычно представлены значениями последних в узлах регулярной сетки, покрывающей земную поверхность. В настоящей работе была принята схематизация поверхности суши в виде совокупности 15238 ячеек сетки с одноградусным пространственным разрешением по широте и долготе, разработанная в рамках международного проекта International Satellite Land-Surface Climatology Project Initiative II (ISLSCP II) [16]. Для каждой ячейки при проведении модельных расчетов

Таблица 1. Используемые глобальные базы данных по атмосферным осадкам

База данных	Описание
<i>P4</i>	Чистый реанализ NCEP/DOE
<i>P3</i>	Осадки реанализа NCEP/DOE гибридизированы с наземными наблюдениями из GPCC без поправок на ветер
<i>P2</i>	Осадки реанализа NCEP/DOE гибридизированы с наземными наблюдениями из GPCC с введением поправок на ветер
<i>P2H</i>	Полный гибрид: осадки реанализа NCEP/DOE гибридизированы с данными наземных и спутниковых наблюдений из баз данных GPCC и GPCP соответственно, в наземные наблюдения введены поправки на ветер
<i>P1</i>	Чистый реанализ ERA-40
<i>P1H</i>	Полный гибрид: осадки реанализа ERA-40 гибридизированы с данными наземных и спутниковых наблюдений из баз данных GPCC и GPCP соответственно, в наземные наблюдения введены поправки на ветер

использовались значения параметров подстилающей поверхности и трехчасовая приземная метеорологическая информация за период с 1 июля 1982 г. по 31 декабря 1995 г. из одноградусных глобальных баз данных, подготовленных организаторами проектов ISLSCP II и GSWP-2.

Перечень использованных баз данных по осадкам приведен в табл. 1. Детальное их описание дано в [11, 23]. В их основе – две альтернативные версии, представляющие собой продукты чистого реанализа Национальных центров прогнозов окружающей среды Департамента энергии США (National Centers for Environmental Prediction – Department of Energy (NCEP/DOE)) (база данных *P4*) и Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-analysis-40 (ERA-40)) (база данных *P1*), взятые из архива ISLSCP II. Реанализ представляет собой процедуру расчета и распределения по ячейкам сетки метеорологических характеристик путем обработки значительной по объему синоптической информации, регулярно получаемой от большого числа спутниковых, авиационных, радиозондовых и наземных систем наблюдений. В основе процедуры реанализа – спектральная модель общей циркуляции атмосферы и система статистической интерполяции получаемых результатов по ячейкам сетки. Поэтому результаты реанализа, как правило, содержат систематические ошибки [23]. Для их устранения организаторами проекта GSWP-2 была предпринята так называемая гибридизация результатов реанализа с данными наблюдений. Базы данных последних также имеются в архиве ISLSCP II. Они основаны на результатах измерений осадков, интерполированных в узлы ячеек сетки с пространственным разрешением от 0.5 до 2.5°, и имеют довольно грубое временное разрешение (чаще всего месячное), поэтому непригодны для непосредственного применения в LSM-моделях, требующих гораздо более высокое

разрешение по времени (обычно от 30 мин до нескольких часов).

В данном случае для гибридизации были использованы три базы данных наблюдений с месячными значениями измеренных осадков: база данных Университета Восточной Англии Climate Research Unit (CRU) [19], а также базы данных Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) [21] и Global Precipitation Climatology Project (GPCP) [15]. Первые две базы имеют 0.5°-ное пространственное разрешение и основаны на данных наземных измерений осадков без учета поправок на ветер, причем в GPCC задействовано большее число осадкомеров. В основе базы данных GPCP – результаты наземных измерений осадков из GPCC (в которые введены поправки на ветер) и данные спутниковых измерений. Исходная база данных GPCP имеет более грубое (2.5°) пространственное разрешение. На ее основе для ISLSCP была подготовлена одноградусная версия.

На первом этапе гибридизации полученные в результате NCEP/DOE реанализа осадки (база данных *P4*) (табл. 1) были скомбинированы с данными из GPCC для основного расчетного периода (с 1 января 1986 по 31 декабря 1995 гг.) и из базы данных CRU для периода раскрутки модели, для которого данные GPCC отсутствовали. В результате была получена база данных по осадкам *P3*, не содержащая поправок на ветер. Эти поправки были введены на следующем этапе, в результате чего была получена база данных *P2*. И наконец, для районов с низкой плотностью осадкомеров подключались данные спутниковых наблюдений из GPCP. В результате получился полностью гибридизированный продукт, который для удобства назовем *P2H*. Аналогичная процедура была проделана с осадками реанализа ERA-40 (база данных *P1*), полный гибрид которых обозначим как *P1H* (промежуточные варианты гибридизации не были предоставлены). Таким образом, было получено 6

различных глобальных баз данных по атмосферным осадкам.

Помимо этого, для всех вариантов расчетов использовались гибридизированные базы данных по температуре и влажности воздуха (гибриды NCEP/DOE реанализа со среднемесячными результатами соответствующих измерений из базы данных CRU), база данных по приходящей радиации Surface Radiation Budget (SRB), а также базы данных по приземному атмосферному давлению и скорости ветра (продукты реанализа NCEP/DOE).

Для расчетов по модели SWAP необходимы также глобальные базы данных по параметрам подстилающей поверхности – гидрофизическим параметрам почвы (коэффициент фильтрации, наименьшая влагоемкость, влажность завядания, пористость, B -параметр и матричный потенциал при насыщении в параметризации Клэппа и Хорнбергера зависимостей матричного потенциала и коэффициента влагопроводности почвы от ее влажности [10]) и параметрам растительного покрова (высота растительности, глубина корнеобитаемого слоя, относительные площади листьев и стеблей/стволов, доля зеленых листьев, коэффициент экстинкции, параметр шероховатости, высота слоя вытеснения, альbedo, емкость перехвата атмосферных осадков, характерный размер листа и др.). При создании базы данных по параметрам подстилающей поверхности, адаптированной под модель SWAP, за основу была принята глобальная база данных, предложенная организаторами проекта GSWP-2, из которой были устранены грубые несоответствия и ошибки и которая была дополнена авторами статьи рядом специфических параметров, необходимых при работе с моделью SWAP (детально этот процесс описан в [7]).

И наконец, несколько слов о последней группе данных – топографических характеристиках, включающих в себя среднюю высоту земной поверхности для ячейки расчетной сетки и средние углы наклона этой поверхности в меридиональном и широтном направлениях, необходимые для расчетов трансформации стока в пределах расчетной ячейки. Высоты были взяты из информационной базы Центра данных по системам наблюдений за ресурсами Земли (Earth resources observation systems Data Center (EDC)), углы наклона рассчитаны авторами по данным о средних высотах соседних ячеек.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАГООБМЕНА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СУШИ С АТМОСФЕРОЙ

Результаты расчетов по модели SWAP

Вышеописанные базы данных послужили исходной информацией для расчета характеристик влагообмена всей поверхности суши с атмосферой

с использованием модели SWAP. Модельные расчеты проводились с трехчасовым шагом для каждой из 15238 ячеек для вышеуказанного периода. Всего было проведено 6 модельных расчетов с различными базами данных по осадкам и, следовательно, получено 6 вариантов глобальных оценок характеристик влагообмена. Для удобства каждый расчет будем называть экспериментом и обозначать в соответствии с наименованием исходной базы данных по осадкам (из табл. 1). Использование альтернативных баз данных позволило выявить, насколько различия в задаваемых осадках могут повлиять на глобальные оценки составляющих водного баланса суши.

Годовые значения смоделированных характеристик влагообмена суши с атмосферой, усредненные по всем расчетным ячейкам и за 10-летний период, приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, осадки, взятые из различных баз данных, существенно различаются даже по своим интегральным показателям. Так, глобальные годовые осадки изменяются от 736 (эксперимент $P3$) до 1002 мм/год (эксперимент $P2$), т.е. на 266 мм/год, что составляет 36% от минимальных осадков. Отличия по отдельным ячейкам могут быть значительно больше (до 380% относительно минимальных осадков – для экспериментов $P2$ и $P3$). Кроме того, может различаться и пространственно-временное распределение осадков [23]. Все это обусловило существенные различия в смоделированных значениях испарения E и стока R . Так, значения E изменяются в экспериментах от 523 до 607 (на 84) мм/год; значения R варьируют от 213 до 401 (на 188) мм/год, т.е. могут различаться почти вдвое. Увеличение осадков вызвало существенное возрастание поверхностной составляющей стока R_s – от 55 до 121 мм/год, т.е. более чем в два раза (на 120% от минимального рассчитанного значения). В случае реализации в модели хортоновского механизма генезиса стока это обусловлено ростом интенсивности осадков и возрастанием числа случаев, когда интенсивность осадков превышала интенсивность впитывания воды в почву. В случае же реализации механизма стокообразования Дюннэ (когда поверхностный сток возникает после того, как произойдет насыщение влагой почвенной колонки) это связано с увеличением общего объема осадков. Этим же обусловлено и увеличение подземной составляющей стока с 158 до 288 мм/год (на 130 мм/год, или на 82%). Коэффициент стока R/P , отношение испарения к осадкам E/P и отношение реального испарения к потенциальному E/E_0 находятся в следующих пределах: 0.29–0.40, 0.59–0.71 и 0.37–0.43 соответственно. Рассчитанное в разных экспериментах глобальное потенциальное испарение практически не различается, поскольку определяется, главным образом, другими метеоэлементами, которые по экспериментам не менялись. Однако на

Таблица 2. Среднегодовое значения годовых сумм заданных в различных экспериментах осадков и соответствующие им годовые значения характеристик влагообмена, рассчитанные по модели SWAP и осредненные по всей поверхности суши, исключая Антарктиду (R , R_s и R_d – соответственно общий, поверхностный и подземный сток; E_0 и E – соответственно суммарное потенциальное и реальное испарения; здесь и в табл. 3 x_{\max} и x_{\min} – максимальное и минимальное значения переменной)

Эксперимент	Заданные осадки, мм/год	Моделируемые величины								
		сток, мм/год			суммарное испарение, мм/год		R/P	R_s/R_d	E/P	E/E_0
		R_s	R_d	R	E_0	E				
$P3$	736	55	158	213	1405	523	0.29	0.35	0.71	0.37
$P1H$	794	72	163	235	1403	557	0.30	0.44	0.70	0.40
$P2H$	837	84	188	272	1401	562	0.33	0.45	0.67	0.40
$P1$	864	73	254	328	1403	535	0.38	0.29	0.62	0.38
$P4$	994	93	288	381	1400	607	0.38	0.32	0.61	0.43
$P2$	1002	121	279	401	1399	592	0.40	0.43	0.59	0.42
Статистика по экспериментам										
x_{\min}	736	55	158	213	1399	523	0.29	0.29	0.59	0.37
x_{\max}	1002	121	288	401	1405	607	0.40	0.45	0.71	0.43
$x_{\max} - x_{\min}$	266	66	130	188	6	84	0.11	0.16	0.12	0.06
x_{\max}/x_{\min}	1.36	2.2	1.82	1.88	1.00	1.16	1.38	1.55	1.20	1.16

региональном уровне могут быть различия, о чем будет сказано ниже. Таким образом, сток и коэффициент стока наиболее чувствительны к неопределенностям в задаваемых осадках.

В табл. 2 и на рис. 1 базы данных по осадкам расположены в порядке возрастания глобальных осадков. Это дает возможность проследить, как различные характеристики отреагировали на увеличение осадков. Как видно, глобальный сток и коэффициент стока при увеличении глобальных осадков неизменно растут; что касается испарения, то при общей тенденции роста иногда отмечается небольшое его уменьшение. Так, в экспериментах $P1$ и $P2$ осадки увеличились на 27 и 8 мм/год по сравнению с $P2H$ и $P4$ соответственно, при этом испарение уменьшилось на 27 и 15 мм/год. Это может быть связано с влиянием различий в пространственно-временном распределении осадков в соответствующих базах данных и с региональными изменениями потенциального испарения.

На рис. 2а–в показано широтное распределение составляющих водного баланса в шести экспериментах. Прежде всего остановимся на профилях осадков из различных баз данных (рис. 2а). Нетрудно заметить, что осредненные по широтным зонам осадки варьируют по экспериментам в большей степени по сравнению с рассмотренными выше их глобальными значениями. При этом наибольшие различия (до 1150 мм/год) наблюдаются в средних широтах южного полушария. В экваториальных широтах диапазон изменения осадков составляет 650 мм/год, а в средних широтах

северного полушария – 420 мм/год. В районе экватора неплохо согласуются между собой, во-первых, осадки, являющиеся продуктами чистого реанализа (базы данных $P4$ и $P1$), а во-вторых, все остальные гибридизированные продукты (особенно $P2H$, $P1H$ и $P3$). Гибридизация осадков реанализа с данными наблюдений позволила заметно снизить их значения. В средних и высоких широтах первая стадия гибридизации осадков NCEP/DOE-реанализа ($P4$) привела к их уменьшению (в $P3$) в основном на 20–30%. Последующее введение поправки на ветер существенно увеличило осадки ($P2$), особенно в средних и высоких широтах, где среднеширотные годовые осадки увеличились (по сравнению с $P3$) более чем в 1.5 раза (в южном полушарии до 2.9 раз). По отдельным расчетным ячейкам в южном полушарии годовые осадки возросли более чем в 4 раза, что свидетельствует о нереально больших значениях поправок. Этот недостаток был отчасти устранен на следующем, заключительном этапе гибридизации, в результате которой $P2$ -осадки были значительно уменьшены (можно сравнить $P2$ и $P2H$). Однако сопоставление полностью гибридизированных осадков $P2H$ с осадками, измеренными на ряде метеорологических станций, расположенных на севере европейской территории России, показало, что значения зимних гибридизированных осадков превышают данные измерений примерно вдвое [6].

Различия в исходных базах данных по осадкам привели к существенным различиям в значениях смоделированного стока (рис. 2б). Широтные

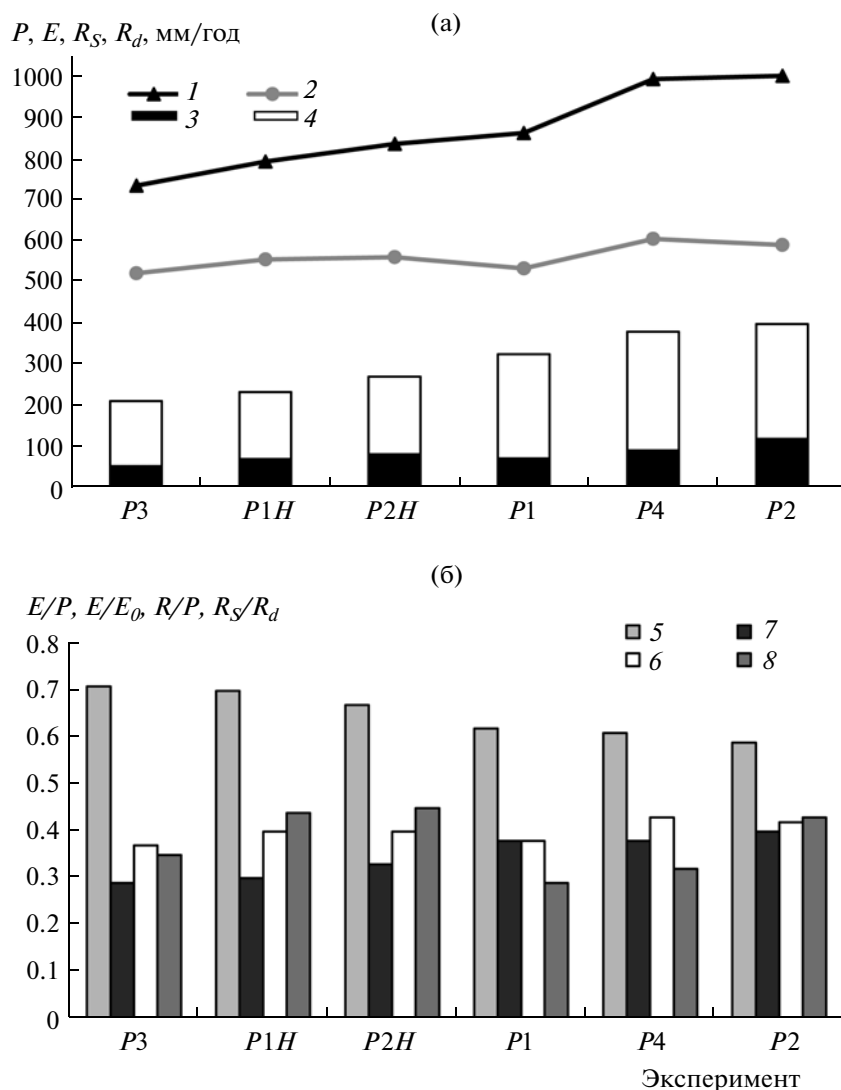


Рис. 1. Годовые суммы осадков P в различных экспериментах, ранжированные в порядке возрастания, и соответствующие им смоделированные значения следующих характеристик: испарения E 2, поверхностного R_s 3 и подземного R_d 4 стока, коэффициента стока R/P 5, отношений испарения к осадкам E/P 6 и потенциальному испарению E/E_0 7 и отношения поверхностного стока к подземному R_s/R_d 8 в шести экспериментах с осадками (P_4 , P_3 , P_2 , P_{2H} , P_1 и P_{1H}). Все характеристики осреднены по всей поверхности суши земного шара (за исключением Антарктиды) за 1986–1995 гг.

профили стока, полученные в разных экспериментах, хорошо согласуются с соответствующими профилями осадков. В наибольшей степени рассчитанные значения стока различаются в средних широтах южного полушария – до 800–1000 мм/год, в районе экватора различия уменьшаются до 530–600 мм/год, а в средних широтах северного полушария – до 340 мм/год. В остальных случаях результаты расчетов лучше согласуются между собой. В отличие от стока, рассчитанные в шести экспериментах значения испарения имеют гораздо меньший разброс (рис. 2в), особенно в тех районах, где испарение лимитируется не водным фактором, а энергетическим (районы вы-

соких и экваториальных широт), или же где осадки очень малы (в аридных областях).

Рис. 2г помогает понять, как неопределенности в осадках, связанные с использованием различных баз данных, трансформируются в неопределенности в смоделированных значениях стока и испарения. Рассмотрим широтные профили относительных диапазонов изменений стока $\Delta R/\Delta P$ и испарения $\Delta E/\Delta P$ (где $\Delta = x_2 - x_3$ – разность значений переменной x в экспериментах с наиболее различающимися осадками P_2 и P_3 , которую можно рассматривать как диапазон неопределенности в оценках рассматриваемой переменной). В высоких широтах (выше 50°) в обоих полушариях

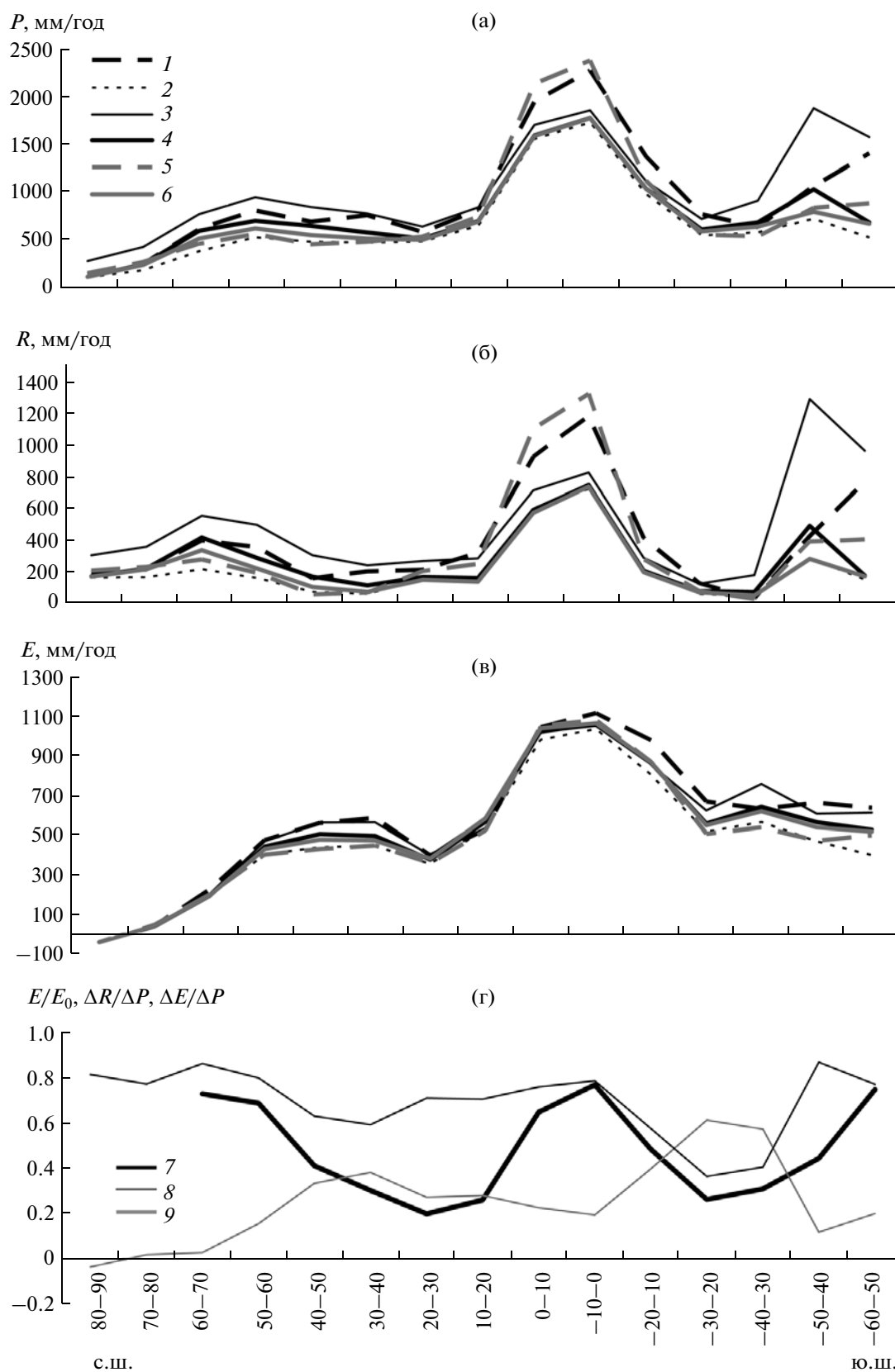


Рис. 2. Широтное распределение годовых сумм осадков P (а), стока R (б) и испарения E (в) в шести экспериментах с осадками (P_4 1, P_3 2, P_2 3, P_2H 4, P_1 5 и $P1H$ 6), отношения реального испарения к потенциальному E/E_0 7 (г) (значения E и E_0 осреднены по всем экспериментам), а также отношений диапазонов изменений стока и испарения к диапазону изменения осадков (соответственно $\Delta R/\Delta P$ 8 и $\Delta E/\Delta P$ 9) в экспериментах с максимальными (P_2) и минимальными (P_3) осадками.

и вблизи экватора, где увлажнение достаточное и испарение приближается к потенциальному, т.е. значения E/E_0 высоки, увеличение осадков вызывает, главным образом, увеличение стока (для увеличения испарения необходимо было бы увеличить приток энергии, чего в экспериментах не проводилось). Поэтому в этом случае различия в осадках в разных экспериментах в наибольшей степени сказываются на значениях смоделированного стока, приводя к большим неопределенностям в его оценках (значения $\Delta R/\Delta P$ максимальны, а $\Delta E/\Delta P$ — минимальны). В широтных поясах с наименьшими значениями E/E_0 , т.е. там, где испарение лимитируется недостатком влаги, неопределенности в задаваемых осадках, главным образом, трансформируются в неопределенности в оценках испарения, в то время как сток остается практически нечувствительным к различиям в осадках. В этом случае отношение $\Delta E/\Delta P$ достигает максимальных значений, в то время как $\Delta R/\Delta P$ — минимальных. Это очень хорошо прослеживается в районе 20–30° ю.ш. (рис. 2г), в северном полушарии в этих же широтах зависимость не столь четкая, поскольку пояс 20–30° с.ш. слишком неоднородный: он включает в себя самые аридные территории на Земле (в частности, Сахару) и очень влажные районы у подножия Гималаев. Чтобы устранить влияние этой неоднородности на выявленную закономерность, были построены карты распределения неопределенностей в осадках, стоке и испарении (рис. 3, 4). Карты также построены по данным экспериментов $P2$ и $P3$, в которых базы данных по осадкам различались в наибольшей степени.

На рис. 3 представлены максимальные неопределенности (диапазоны различий) в годовых суммах осадков ΔP в связи с использованием различных баз данных по осадкам и соответствующие им неопределенности в смоделированных значениях стока ΔR и испарения ΔE . Как видно из рис. 3, прирост осадков в тропических и высоких широтах идет главным образом на формирование стока. Интересно, что в ряде мест севернее 45° с.ш., где реальное испарение приближается к потенциальному ($E/E_0 \rightarrow 1$), увеличение осадков привело даже к снижению испарения. Это связано с уменьшением потенциального испарения, что, главным образом, было вызвано увеличением количества твердых осадков, повлекшим за собой формирование большего количества снеготаяния и увеличение продолжительности залегания снежного покрова, что, в свою очередь, привело к увеличению количества отраженной радиации (вследствие увеличения альбедо подстилающей поверхности), а также затрат энергии на снеготаяние и, следовательно, к уменьшению энергии, которая может быть затрачена на испарение.

На рис. 4а, б приведены карты распределения значений отношений $\Delta R/\Delta P$ и $\Delta E/\Delta P$, показывающих, как неопределенности в исходных осадках перераспределяются между неопределенностями в смоделированных значениях стока и испарения. Чем больше значения этих отношений, тем в большей степени неопределенности в осадках влияют на неопределенности в оценках той или иной переменной. Как видно, пространственное распределение $\Delta R/\Delta P$ практически повторяет распределение E/E_0 . Что касается распределения $\Delta E/\Delta P$, то значения этого отношения находятся в противофазе к E/E_0 . Все это хорошо согласуется с рис. 2г и подтверждает ранее найденные закономерности.

Таким образом, влияние неопределенностей в задаваемых осадках на оценки стока и испарения в разных районах земного шара проявляется по-разному в зависимости от величины E/E_0 .

Результаты расчетов по ансамблю моделей

Глобально осредненные среднемноголетние оценки стока и испарения, рассчитанные по моделям SWAP, NSIP, NOAH и SSiB, приведены в табл. 3. Там же представлена статистика по ансамблю моделей и для каждой модели по экспериментам. Анализируя представленные в табл. 3 результаты, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, подтверждается ранее сделанное заключение, что глобальный сток более чувствителен к неопределенностям в осадках, чем испарение. Это выражается как в абсолютных оценках различий между смоделированными годовыми значениями этих переменных, так и в относительных значениях x_{\max} , полученных в эксперименте $P2$, к минимальным x_{\min} в эксперименте $P3$ варьирует по моделям от 1.57 (модель SSiB) до 1.88 (модель SWAP), в то время как для испарения — от 1.11 (NOAH) до 1.14 (SSiB) (глобальные годовые суммы осадков в этих экспериментах различаются в 1.36 раза). Средние отношения по ансамблю моделей составляют 1.75 для стока и 1.13 для испарения.

Во-вторых, полученные значения годового стока и испарения значительно варьируют по моделям (последняя колонка табл. 3). При этом абсолютные межмодельные различия для стока и испарения практически одинаковы, в то время как относительные — для стока больше, чем для испарения (максимальные относительные различия получены для стока в эксперименте $P3$ с минимальными осадками $x_{\max}/x_{\min} = 1.69$). Что касается испарения, то, как следует из табл. 3, для всех гибридов реанализа NCEP/DOE ($P2$, $P3$ и $P2H$) относительный межмодельный разброс в оценках испарения практически одинаков, независимо от

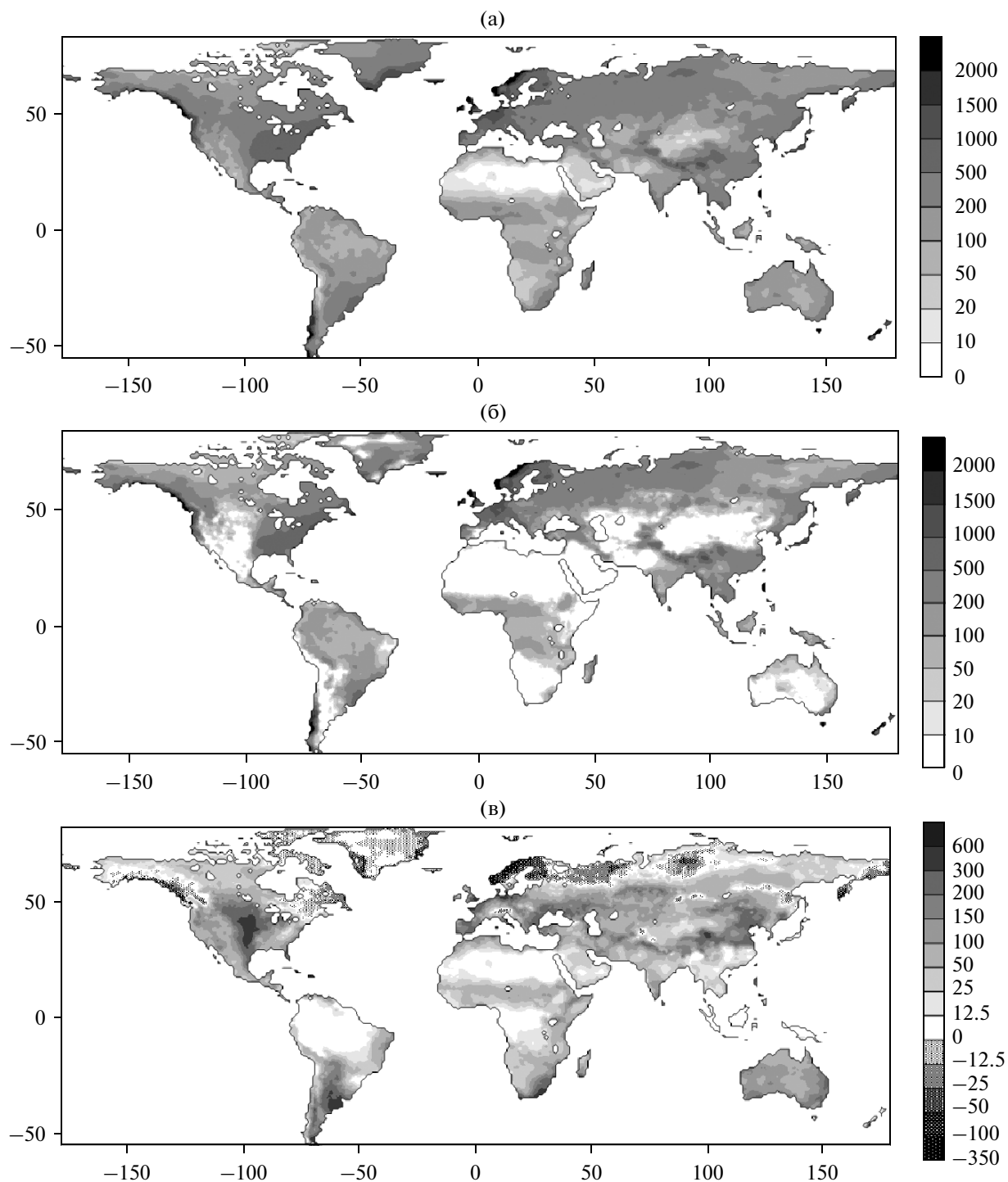


Рис. 3. Неопределенности (диапазоны различий) в годовых суммах осадков ΔP (а) в базах данных $P2$ и $P3$, а также соответствующие им неопределенности в смоделированных значениях стока ΔR (б) и испарения ΔE (в), мм/год.

общего количества осадков, а в случае реанализа ERA-40 (эксперимент $P1$) разброс немного меньше. Это связано, вероятно, с различиями в пространственно-временной структуре полей осадков двух вариантов реанализа.

В-третьих, глобальные оценки годового испарения в большей степени зависят от выбора LSM-модели (различия по моделям варьируют от 123 до 159 мм/год в разных экспериментах), чем от выбора базы данных по осадкам (различия по экспери-

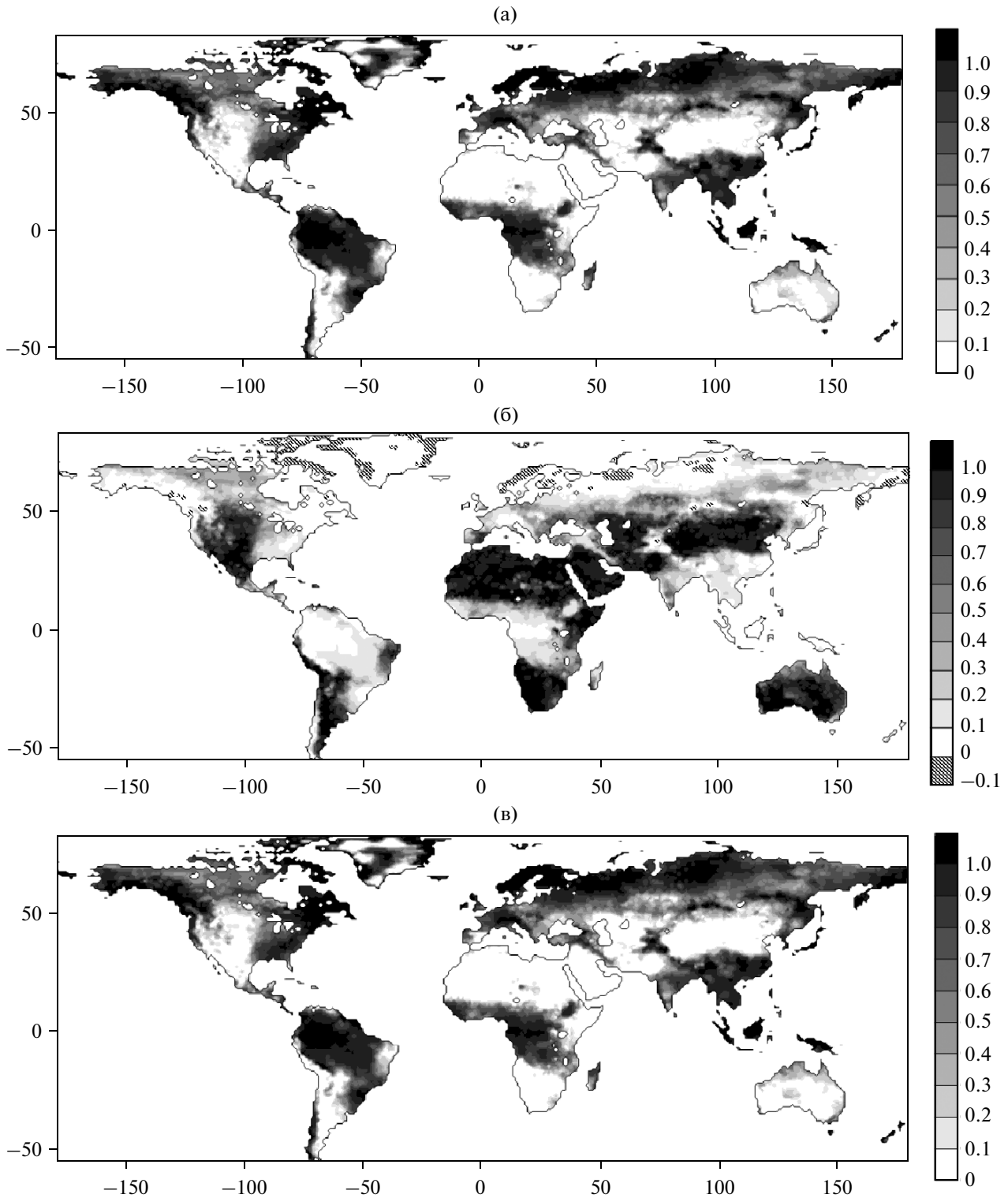


Рис. 4. Карты распределения значений отношений $\Delta R/\Delta P$ (а), $\Delta E/\Delta P$ (б) и E/E_0 (в), полученных с использованием баз данных по осадкам P_2 и P_3 .

ментам варьируют от 55 до 69 мм/год для разных моделей), в то время как ситуация со стоком — обратная (различия по моделям практически такие

же, как в случае с испарением, а различия по экспериментам существенно их превышают и составляют от 187 до 208 мм/год).

Таблица 3. Среднегодовое количество осадков и соответствующие им годовые значения стока и испарения, мм/год, рассчитанные по четырем LSM-моделям и осредненные за 1986–1995 гг. и по всей поверхности суши, исключая Антарктиду (\bar{x} – среднее значение переменной). Жирным шрифтом дана общая статистика по ансамблю моделей и по экспериментам

Эксперимент	Осадки	Модели				Статистика по ансамблю моделей				
		SWAP	NSIP	NOAH	SSiB	\bar{x}	x_{\min}	x_{\max}	$x_{\max} - x_{\min}$	x_{\max}/x_{\min}
Испарение										
<i>P3</i>	736	523	505	439	378	461	378	523	145	1.38
<i>P2H</i>	837	562	541	469	406	494	406	562	155	1.38
<i>P1</i>	864	535	553	443	429	490	429	553	123	1.29
<i>P2</i>	1002	592	572	487	433	521	433	592	159	1.37
Статистика по экспериментам										
\bar{x}	860	553	543	459	412	492				
x_{\min}	736	523	505	439	378		378			
x_{\max}	1002	592	572	487	433			592		
$x_{\max} - x_{\min}$	266	69	67	48	55				214	
x_{\max}/x_{\min}	1.36	1.13	1.13	1.11	1.14					1.57
Сток										
<i>P3</i>	736	213	231	305	360	277	213	360	147	1.69
<i>P2H</i>	837	273	296	372	431	343	273	431	158	1.58
<i>P1</i>	864	328	311	426	435	375	311	435	123	1.40
<i>P2</i>	1002	401	430	512	564	477	401	564	163	1.41
Статистика по экспериментам										
\bar{x}	860	304	317	404	447	368				
x_{\min}	736	213	231	305	360		213			
x_{\max}	1002	401	430	512	564			564		
$x_{\max} - x_{\min}$	266	187	199	208	204				351	
x_{\max}/x_{\min}	1.36	1.88	1.86	1.68	1.57					2.64

Наконец, отметим, что в целом неопределенности, связанные с выбором как базы данных по осадкам (*P1*, *P2*, *P3* или *P2H*), так и модели для расчета (SWAP, NSIP, NOAH или SSiB), привели к тому, что полученные глобальные оценки годового испарения изменяются от 378 (эксперимент *P3*, модель SSiB) до 592 мм/год (эксперимент *P2*, модель SWAP), т.е. различаются на 214 мм/год, или в 1.57 раза, а глобальные оценки годового стока варьируют от 213 до 564 мм/год, т.е. различаются на 351 мм/год, или в 2.64 раза.

Широтное распределение годовых значений стока и испарения, полученных по четырем моделям в эксперименте *P2H*, показано на рис. 5а, б. Отметим, что основные закономерности распределения испарения и стока по широтам воспроизводят все модели, однако межмодельный разброс в

оценках годовых величин стока и испарения существует и составляет от 50 мм/год в высоких широтах северного полушария до 280 мм/год в районе экватора и до 350 мм/год в районе 50–60° ю.ш. Опять же для испарения неопределенности, обусловленные выбором моделей, больше, чем неопределенности, связанные с выбором базы данных по осадкам (можно сравнить рис. 5б и 2в), а для стока наоборот (рис. 5а и 2б).

На рис. 5г показано, как неопределенности в заданных значениях осадков, связанные с выбором базы данных, трансформируются в неопределенности в оценках стока и испарения, полученных по ансамблю моделей. Этот рисунок похож на рассмотренный ранее рис. 2г, что свидетельствует о том, что закономерности, полученные с помо-

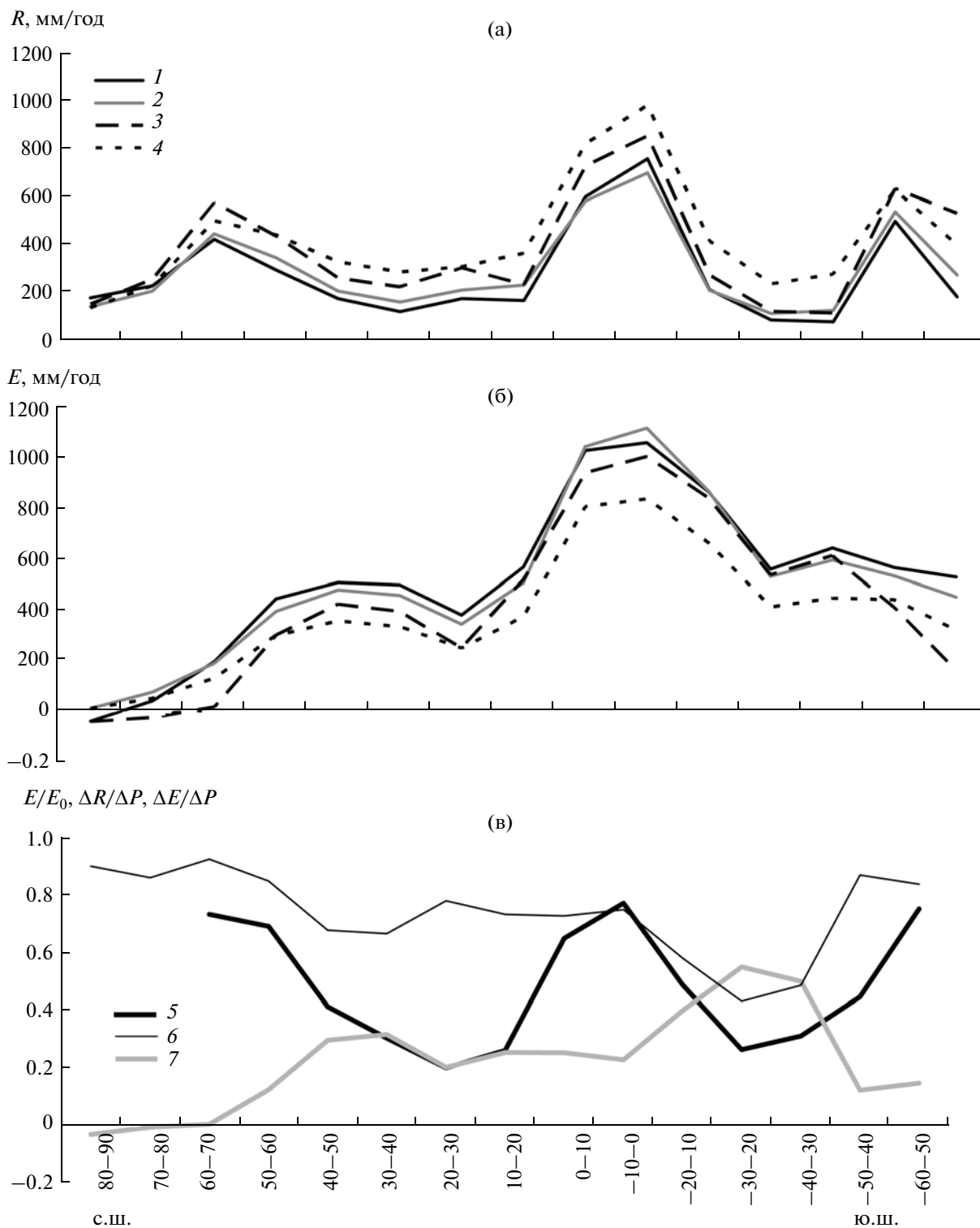


Рис. 5. Широтное распределение годовых сумм стока R (а) и испарения E (б), рассчитанных по моделям SWAP 1, NSIP 2, NOAH 3 и SSiB 4 в эксперименте с осадками $P2H$; отношения реального испарения к потенциальному E/E_0 5 (в) (значения E и E_0 рассчитаны по SWAP и осреднены по всем экспериментам), а также осредненных по ансамблю моделей отношений диапазонов изменений стока и испарения к диапазону изменения осадков (соответственно $\Delta R/\Delta P$ 6 и $\Delta E/\Delta P$ 7) в экспериментах с $P2$ и $P3$ осадками.

щью модели SWAP, подтверждаются расчетами по четырем моделям.

ВЫВОДЫ

Проанализированы результаты расчетов характеристик водного баланса суши, проведенных с одноградусным пространственным разрешением для всей поверхности суши земного шара, за исключением Антарктиды, и с трехчасовым шагом по времени за период с 1 июля 1982 г. по 31 декабря 1995 г. с использованием физико-математической LSM-модели SWAP и глобальных одноградусных баз данных по метеорологическим элементам и параметрам подстилающей поверхности, подготовленных в рамках международного проекта GSWP-2. Использование шести альтернативных баз данных по осадкам позволило получить 6 вариантов среднесезонных оценок составляющих водного баланса суши и выявить, в какой степени неопределенности в осадках могут повлиять на глобальные оценки характеристик влагообмена. Наиболее важные выводы заключаются в следующем.

Различия в задании исходных значений атмосферных осадков существенно влияют на смоделированное разделение осадков между испарением и стоком, что приводит к неопределенностям в глобальных оценках составляющих водного баланса суши, выражающимся в большом разбросе их значений. Рассчитанные значения глобального стока в зависимости от выбранной базы данных различались максимально в 1.9 раза, значения его поверхностной и подземной составляющих – в 2.2 и 1.8 раза соответственно, коэффициента стока – в 1.4, испарения и его производных – в 1.2 раза.

Рассчитанный сток и его составляющие оказались наиболее чувствительными к неопределенностям в задании исходных значений осадков, поэтому следует особенно внимательно относиться к выбору базы данных по осадкам при расчетах, связанных с необходимостью оценки именно этих характеристик.

Влияние неопределенностей в значениях осадков, связанных с использованием альтернативных баз данных, на оценки стока и испарения в разных районах земного шара проявляется по-разному в зависимости от значения отношения E/E_0 . В районах с большими значениями E/E_0 неопределенности в задании осадков, главным образом, трансформируются в неопределенности в оценках стока. В районах с минимальными значениями E/E_0 неопределенности в осадках в основном трансформируются в неопределенности в оценках испарения, в то время как сток остается к ним практически нечувствительным. Это следует учитывать при выборе базы данных по осадкам для региональных расчетов.

Поскольку оценки характеристик водного баланса зависят не только от используемой информации, но и от методов расчета, т.е. являются модельно зависимыми, был проведен анализ результатов аналогичных расчетов по трем другим LSM-моделям – NSIP, NOAH и SSiB, подтвердивший найденные с использованием модели SWAP закономерности.

Получено, что глобальные оценки годового испарения в большей степени зависят от выбора LSM-модели, чем от выбора базы данных по осадкам, в то время как ситуация с рассчитанным стоком – обратная.

В целом неопределенности, связанные с выбором как базы данных по осадкам, так и модели для расчета, привели к тому, что полученные глобальные оценки годового испарения максимально различались на 214 мм/год, или в 1.6 раза, а глобальные оценки годового стока – на 351 мм/год, или в 2.6 раза.

Автор выражает благодарность организаторам международного проекта GSWP-2 за предоставленные базы данных для модельных расчетов и возможность пользоваться результатами расчетов по всем моделям, участвовавшим в проекте, а также всем участникам проекта за проделанную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация тепло- и влагообмена на поверхности суши при сопряжении гидрологических и климатических моделей // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25. № 4. С. 421–431.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация процессов тепловлагообмена в системе “грунтовые воды–почва–растительный/снежный покров–атмосфера” для территорий с четко выраженной сезонной изменчивостью климата // Почвоведение. 2000. № 6. С. 733–747.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация процессов тепловлагообмена в бореальных лесных экосистемах // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 2. С. 182–200.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование процессов тепловлагообмена суши с атмосферой в локальном масштабе для территорий с многолетней мерзлотой // Почвоведение. 2004. № 9. С. 1077–1092.
5. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
6. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э. Использование модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой для расчетов речного стока в высоких широтах // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 181–195.
7. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э. Моделирование составляющих теплового и водного балан-

- сов поверхности суши земного шара // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 664–676.
8. *Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э.* Глобальные оценки составляющих теплового и водного балансов суши // Изв. РАН. Серия геогр. 2008. № 1. С. 8–19.
 9. *Chen F., Mitchell K., Schaake J. et al.* Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № D3. P. 7251–7268.
 10. *Clapp R.B., Hornberger G.M.* Empirical equations for some soil hydraulic properties // *Water Resour. Res.* 1978. V. 14. № 4. P. 601–604.
 11. *Dirmeyer P., Gao X., Oki T.* The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan // IGPO Publ. Series. Silver Spring: Intern. GEWEX Project Office, 2002. № 37. 75 p.
 12. *Gusev Ye.M., Nasonova O.N.* The land surface parameterization scheme SWAP: description and partial validation // *Global Planetary Change.* 1998. V. 19. № 1–4. P. 63–86.
 13. *Gusev Ye.M., Nasonova O.N.* The simulation of heat and water exchange at the land-atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP // *Hydrol. Processes.* 2002. V. 16. № 10. P. 1893–1919.
 14. *Gusev Ye.M., Nasonova O.N.* Modelling heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP // *J. Hydrol.* 2003. V. 280. № 1–4. P. 162–191.
 15. *Huffman G.J., Adler R.F., Arkin P. et al.* The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1997. V. 78. № 1. P. 5–20.
 16. ISLSCP Initiative II. NASA / Eds. Hall F., Collatz G., Los S. et al // DVD/CD-ROM 2005.
 17. *Koster R.D., Suarez M.J., Ducharme A. et al.* A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM. Pt 1. Model Structure // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № D20. P. 24809–24822.
 18. *Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev Ye.E.* Impact of uncertainties in meteorological forcing data and land surface parameters on global estimates of terrestrial water balance components // *Hydrol. Processes.* 2011. V. 25. № 7. P. 1074–1090.
 19. *New M., Hulme M., Jones P.* Representing twentieth-century space-time climate variability. Pt II: Development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate // *J. Climate.* 2000. V. 13. № 13. P. 2217–2238.
 20. *Polcher J.* The global land-atmosphere system study (GLASS) // *BAHC/GEWEX News Joint Issue.* 2001. V. 11. № 2. P. 5–6.
 21. *Rudolf B., Hauschild H., Reuth W., Schneider U.* Terrestrial precipitation analysis: Operational method and required density of point measurements // *NATO ASI Series I: Global Precipitation and Climate Change.* Berlin: Springer-Verlag, 1994. V. 26. P. 173–186.
 22. *Xue Y., Sellers P. J., Kinter III J.L., Shukla J.* A Simplified Biosphere Model for Global Climate Studies // *J. Climate.* 1991. V. 4. № 3. P. 345–364.
 23. *Zhao M., Dirmeyer P.A.* Production and analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets. Calverton: Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, 2003. Techn. Rep. № 159. 36 p.