РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

РФФИ

ISSN 1605-8070

ВЕСТНИК РФФИ

2 (78) апрель-июнь 2013

ВЕСТНИК РФФИ

№ 2 (78) апрель–июнь 2013 года

Основан в 1994 году
Зарегистрирован Комитетом РФ по печати,
рег. № 012620 от 03.06.1994 г.

Учредитель
федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский фонд фундаментальных исследований»

Главная редакция:

главный редактор В.Я. Панченко,

заместитель главного редактора В.В. Квардаков,

Приглашенный редактор В.И. Данилов-Данильян

Редакционная коллегия:

В.А. Геловани, Ю.Н. Кульчин, В.П. Матвеенко, Е.И. Моисеев,
А.М. Музафаров, Р.В. Петров, И.Б. Федоров, В.В. Ярмолюк,
П.П. Пашинин, Е.Н. Черных, В.А. Шахнов

Редакция:

В.И. Елисеев, А.П. Локтев, А.О. Тимофеева

Адрес редакции:

119991, Москва, Ленинский проспект, 32а
Тел.: (495) 952 6053, факс: (495) 952 5541
e-mail: pressa@rfbr.ru

© Российский фонд фундаментальных исследований, 2013.

JOURNAL RFBR

Number 2 (78) April-June 2013

Founded in 1994
Registered in the Joined by the Committee of the Russian Federation for Press,
reg. Number 012620 on 03.06.1994

The Founder
Federal State Institution
«Russian Foundation for Basic Research»

Editor-in-Chief V. Panchenko,
Deputy chief editor V. Kvardakov,

Guest Editor V. Danilov-Danil'jan

Editorial Board:
V. Gelovani, J. Kul'chin, V. Matveenko, E. Moiseev
A. Muzafarov, R. Petrov, I. Fedorov, V. Yarmolyuk
P. Pashinin, E. Chernykh, V. Shakhnov

Editorial:
V. Eliseev, A. Loktev, A.Timofeeva

Editorial address:
119991, Moscow, Leninsky Prospect, 32a
Tel.: (495) 952 6053, fax: (495) 952 5541
e-mail: pressa@rfbr.ru

© Russian Foundation for Basic Research, 2013.

«Вестник РФФИ»
№ 2 (78) апрель-июнь 2013 г. (Приложение к «Информационному бюллетеню» № 21)

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК: МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГОД ВОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Аннотация к тематическому блоку.....6

О редакторе тематического блока члене-корреспонденте РАН В.И. Данилове-Данильяне.....8

Музылев Е.Л., Гельфан А.Н., Старцева З.П., Успенский А.Б..
Моделирование водного режима обширных территорий с использованием спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности.....9

Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.
Моделирование стока рек северо-западной части России с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP.....19

Михайлов В.Н., Михайлова М.В.
Физические основы гидрологических и морфологических процессов в речных дельтах.....26

Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Телегина А.А..
Изменения поверхностного и подземного стока рек России и их режимов в условиях нестационарного климата.....34

Филатов Н.Н., Руховец Л.А., Назарова Л.Е., Баклагин В.А., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Толстиков А.В., Шаров А.Н.
Влияние изменений климата на экосистемы озер.....43

Кременецкая Е.Р., Бреховских В.Ф., Вишневская Г.Н., Ломова Д.В., Перекальский В.М., Соколов Д.И.
Влияние стратификации на седиментационные потоки в долинном водохранилище.....51

Екайкин А.А., Козачек А.В., Липенков В.Я., Преображенская А.В., Шибаев Ю.А.
Гидрологический режим подледникового озера Восток (Антарктида) по данным геохимических исследований ледяного керна и озерной воды.....57

Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Бибикова Т.С., Зайцева И.С.
Водообеспеченность и антропогенная нагрузка на водные ресурсы России в сравнении с другими странами.....64

КОНФЕРЕНЦИИ

Степанова М.И.
Всероссийские научные конференции Научного совета Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши».....74

«RFBR Journal»
№ 2 (78), January–March 2013 (Supplement to RFBR «Information Bulletin» No 21)

THEMATIC SECTION DEDICATED TO THE INTERNATIONAL YEAR OF WATER COOPERATION

Abstract of the thematic section.....6

About the editor of the thematic section, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences V. Danilov-Danilyan 8

Muzylev E.L., Gelfan A.N., Startseva Z.P., Uspensky A.B.
Modeling water regime of vast regions utilizing satellite data on land surface characteristics 9

Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ya.
Simulation of river runoff in the north-western part of Russia using the land surface model SWAP 19

Mikhailov V.N., Mikhailova M.V.
Physical principals of hydrological and morphological processes in river deltas.....26

Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireyeva M.B., Telegina A.A.
Variations in Surface and Subsurface Runoff and the Regimes of Russian Rivers under Unsteady Climate.....34

Filatov N.N., Rukhovets L.A., Nazarova L.E., Baklagin V.A., Georgiyev A.P., Yefremova T.V., Palshin N.I., Tolstikov A.V., Sharov A.N..
Impact of climate change on lake ecosystems 43

Kremenetskaya E.R., Brekhovskikh V.F., Vishnevskaya G.N., Lomova D.V., Perekalsky V.M., Sokolov D.I.
Influence of stratification on sediment flows in a valley reservoir 51

Ekaykin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Ya., Preobrazhenskaya A.V., Shibayev Yu.A.
Hydrological regime of sub-glacial Lake Vostok (Antarctica) according to the evidence derived from the geochemical research on the ice core and the lake water...57

Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Bibikova T.S., Zaytseva I.S.
Water supply and anthropogenic load on water resources of Russia in comparison with other countries.....64

CONFERENCES

Stepanova M.I.
All-Russian scientific conference of the scientific Council of the Earth Sciences Department of Russian Academy of Sciences «Water-land resources».....74

Аннотация к тематическому блоку

Потребление пресной воды в мире постоянно растет, что обусловлено как увеличением численности населения (несмотря на замедление темпов, этот процесс будет продолжаться до середины XXI в.), так и стремлением всех стран (и бедных, и богатых) поднять уровень благосостояния. Между тем объем экономически доступной пресной воды на Земле сокращается: исчезают малые реки, мелеют реки средние и даже крупные, высыхают или зарастают озера. То, что при этом в Мировом океане воды становится несколько больше, вряд ли может служить утешением. Но главное зло – антропогенное загрязнение водных источников, которое теперь нередко достигает такой интенсивности, что затраты на подготовку воды к хозяйственно-бытовому потреблению становятся сопоставимыми со стоимостью опреснения морской воды.

Современное человечество забирает из водных источников более 4 тыс. км^3, или 4 трлн тонн пресной воды (более ⅔ этого количества потребляет орошаемое земледелие). В пять раз больший объем воды в природных водных объектах служит разбавителем жидких отходов ЖКХ, сельского хозяйства и промышленности. «Неосвоенные», но экономически доступные водные ресурсы в мире близки к исчерпанию. Многие научно-технические достижения, обеспечивающие экономию воды во всех сферах ее потребления, в сложившейся мировой экономической системе не выглядят эффективными: соответствующие инвестиции не сулят быстрой отдачи, не интересуют бизнес, и порочная практика водорасточительства продолжается. В итоге водный дефицит уже стал глобальной проблемой, причиной международной напряженности в ряде регионов мира (вплоть до угроз применения военной силы как средства разрешения водных конфликтов), обусловил массовую миграцию из водонедостаточных стран в водообеспеченные. По оценкам ООН, более 800 млн человек не имеют доступа к безопасной питьевой воде, более 2 млрд страдают от ее нехватки, и прогнозируется, что уже через два десятилетия в таком положении может оказаться половина населения планеты.

Однако беды, обусловленные водой, не ограничиваются ее дефицитом. Огромное количество людей страдают от разрушительных наводнений, результат которых – колоссальный экономический ущерб и многочисленные человеческие жертвы. Из суммы оцененного общего экономического ущерба в мире вследствие стихийных бедствий более трети приходится на гидрологические явления.

Глобальные изменения климата, как ожидается, усугубят водные проблемы. Хотя при глобальном потеплении увеличивается испарение воды с поверхности водных объектов, прежде всего – Мирового океана, а следовательно, и выпадение осадков, но, как показывают практически все известные климатологические модели, на большей части территории суши, особенно в высоких и средних широтах, должен ухудшиться их режим – распределение во времени, а именно: выпадение осадков станет более редким, зато более интенсивным. Следствием редкости станет учащение и усиление засух (то есть ужесточение дефицита воды в водонедостаточных регионах), следствием роста интенсивности – усиление наводнений.

В качестве мер для преодоления водного дефицита и для защиты от разгула водной стихии часто слышатся призывы исправить «ошибки природы»: строить каналы для перераспределения речного стока (в том числе межбассейнового), сооружать «сухие» водохранилища для перехвата паводков и дамбы, направляющие водные потоки в сторону от населенных пунктов и хозяйственных объектов, и т.п. Конечно, в отдельных случаях такие гидротехнические сооружения по-

лезны и даже необходимы, но их строительство и функционирование сопряжены с рядом негативных явлений, которые, в конечном счете, могут нанести экономике и обществу ущерб, превышающий тот, от которого они призваны защитить. Во-первых, они беспрецедентно капиталоемки, причем сроки их окупаемости измеряются десятилетиями; во-вторых, негативные экологические последствия гидротехнического строительства слишком часто оказываются чрезмерными; в-третьих, обеспечение такого гидротехнического строительства требует развития отраслей, отнюдь не способствующих улучшению отраслевой структуры экономики, в наименьшей степени отвечающих представлениям об инновационности и научно-техническом прогрессе; в-четвертых, территориальное перераспределение водных ресурсов соответствует экстенсивному типу развития и, опять-таки, закрепляет консервативные структуры в экономике, в-пятых, реализация таких мер предъявляет спрос на малоквалифицированную рабочую силу, замедляя социальное развитие. Этот список можно продолжать, но сказанного достаточно для обоснования главного вывода: проекты гидротехнических сооружений требуют ответственной всесторонней междисциплинарной экспертизы и не могут быть приняты к реализации при неразрешенных сомнениях относительно оценки их последствий.

Исключительно велика роль науки в решении водных проблем: без опоры на фундаментальные знания и без использования инструментальных методов прикладной гидрологии невозможно прогнозировать гидрологические процессы, экспертировать гидротехнические проекты, планировать развитие водного хозяйства и управлять водными ресурсами. Методологической основой современного комплекса дисциплин, изучающих водные проблемы, стало математическое моделирование, причем используются достижения самых разнообразных разделов математики: дифференциальных уравнений, теории вероятностей и математической статистики, математического программирования, математической теории управления, теории игр и статистических решений, теории катастроф, распознавания образов, нечетких множеств и др. Объектами изучения этого комплекса дисциплин являются поверхностный сток, русловые процессы, подземные воды и их связи с поверхностными, жизненный цикл озер, водные экосистемы и их роль в формировании качества воды, гидрохимические процессы, околоводные (экотонные) экосистемы и их изменения под влиянием водного фактора, антропогенные воздействия на водные объекты, использование водных ресурсов в экономике и управление ими, воздействие климатических изменений на гидрологические процессы и многое другое. Лишь малая часть этой необычайно разнообразной проблематики нашла отражение в данном тематическом блоке.

ООН не раз предпринимала усилия для привлечения внимания мирового сообщества к водным проблемам, в частности, продолжается десятилетие ООН «Вода для жизни» (2005–2015 гг.), 2013 год объявлен Международным годом водного сотрудничества. Совместные усилия всех государств и народов необходимы для решения обостряющихся водных проблем, однако пока эти усилия явно недостаточны. Лишь в проектах существуют серьезные глобальные соглашения об использовании трансграничных вод, вяло идет процесс передачи передовых технологий водопользования из развитых стран в развивающиеся, предстоит создать современную глобальную базу гидрологических данных и базу гидрологических знаний, расширить международное сотрудничество в области гидромониторинга, гидрологических, гидроэкологических, гидроклиматологических, водноресурсных и иных связанных с водными проблемами научных исследований. Российская наука может внести достойный вклад в такое сотрудничество.

О редакторе тематического блока члене-корреспонденте РАН В.И. Данилове-Данильяне

Директор Института водных проблем РАН с 2003 г.,

член-корреспондент РАН с 2003 г.,

доктор экономических наук (1975),

профессор (1979), лауреат Премии Правительства РФ (1996)

ДАНИЛОВ-ДАНИЛЬЯН Виктор Иванович

Данилов-Данильян Виктор Иванович – крупный ученый, специалист в области управления водными ресурсами и водоохранной деятельностью; экологии и охраны окружающей среды, географии и экономики природопользования, системного анализа и моделирования социально-экономических процессов. Автор более 500 научных работ, из них 32 монографии, в том числе за последние 5 лет – свыше 30 статей в рецензируемых журналах и 5 монографий; главный редактор энциклопедических изданий: «Экологическая энциклопедия» в 6-ти томах (2008-2013 гг.), энциклопедия «Реки и озера мира» (2012 г.) и др.

Основные научные результаты В.И. Данилова-Данильяна: выполнил прогностический анализ стратегического значения водных ресурсов на перспективу более 20 лет в условиях глобального дефицита пресной воды; обосновал долгосрочный сценарий, согласно которому основным структурообразующим фактором экономического развития нашей страны в указанный период будут водные ресурсы; сформулировал концепцию реализации этого сценария и основные положения «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года», утвержденной Правительством РФ в 2009 г.; разработал методологии стратегий водопользования, мониторинга и охраны вод; устойчивого развития, решения проблем платности природопользования и природной ренты; принципы интегрированного управления водными ресурсами для повышения надежности водообеспечения регионов России. Результаты его исследований внесли существенный вклад в формирование государственной политики и законодательной основы в области водопользования.

В.И. Данилов-Данильян возглавляет Институт водных проблем РАН с 2003 г.; является признанным научным лидером и организатором работы коллектива. Под его руководством и при непосредственном участии выполняются работы по важнейшим государственным контрактам, программам Президиума РАН, Отделения наук о Земле РАН, крупным комплексным темам.

В.И. Данилов-Данильян заведует кафедрой на факультете государственного управления МГУ им. М.В. Ломоносова, возглавляет базовую кафедру Института водных проблем РАН на экологическом факультете Российского университета дружбы народов, с 2010 г. руководит деятельностью Международной кафедры ЮНЕСКО при ИВП РАН. Под его руководством подготовлено и защищено более 40 кандидатских диссертаций.

В.И. Данилов-Данильян – главный редактор журнала РАН «Водные ресурсы», член редколлегий журналов «Экологическое планирование и управление» «Вода, химия, экология» и др.; председатель Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», возглавляет диссертационный совет по защите докторских диссертаций, председатель экспертного совета Росводресурсов, участвует в работе экспертных, научно-технических и иных советов, комитетов, комиссий и пр.

Моделирование водного режима обширных территорий с использованием спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности*

Музылев Е.Л., Гельфан А.Н., Старцева З.П., Успенский А.Б.

Разработана физико-математическая модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой, предназначенная для расчета составляющих водного и теплового балансов территорий регионального масштаба и позволяющая использовать спутниковые данные о характеристиках подстилающей поверхности и снежного покрова. Разработаны процедуры использования в модели полей спутниковых оценок характеристик растительного и снежного покровов, полученных с помощью разработанных методов тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA, MODIS/EOS Terra и Aqua, AMSR-E/EOS Aqua и SEVIRI/Meteosat-9. Представлены результаты моделирования вертикальных потоков влаги и тепла, влаго- и теплосодержания почвы и снежного покрова для участка территории Центрально-Черноземной зоны Европейской части России площадью 227300 км^2 по данным наземных и спутниковых измерений за 2008–2011 гг.

Ключевые слова: моделирование, водный режим, спутниковые данные

* *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-05-00807а).*

Перспективы развития методов исследования гидрологических систем и прогноза их возможных изменений, уточнения оценок водных ресурсов для различных по размерам территорий связаны с разработкой физико-математических моделей процессов энерго- и массообмена поверхности суши с атмосферой (далее – «LS-модели», Land Surface Models) и, в частности, процессов вертикального влаго- и теплопереноса, существенно влияющих на распределение влаги и тепла на различных участках поверхности и в почве (обзор таких моделей дан, например, в монографии [1]). Точность расчетов гидротермических характеристик для этих процессов при использовании таких моделей в значительной мере зависит от правдоподобности описания самих процессов и качества информационного обеспечения. Совершенствование такого описания возможно при учете влияния неоднородности подстилающей поверхности на процессы ее тепло- и влагообмена с атмосферой и получении надежной информации о пространственных распределениях характеристик подстилающей поверхности и метеорологических условий.

Возможности получения такой информации связаны, в значительной степени, с использованием дистанционных измерительных технологий и, в первую очередь, технологий спутникового зондирования земной поверхности. В статье обобщены основные результаты исследований, проводившихся научными коллективами из Института водных проблем (ИВП) РАН и НИЦ «Планета» Росгидромета в рамках инициативного проекта РФФИ № 10-05-00807а по теме «Исследование особенностей формирования водного и теплового режимов обширных территорий с помощью физико-математических моделей при использовании спутниковых данных дистанционного зондирования Земли».

Модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой

Разработанная в ИВП РАН модель взаимодействия суши с атмосферой состоит из двух основных взаи-

МУЗЫЛЕВ Евгений Львович кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН.

СТАРЦЕВА Зоя Пантелеймоновна кандидат географических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

ГЕЛЬФАН Александр Наумович доктор физико-математических наук, заместитель директора ИВП РАН.

УСПЕНСКИЙ Александр Борисович доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник НИЦ космической гидрометеорологии «Планета» Росгидромета.

мосвязанных частей: моделей вертикального влаго- и теплопереноса в системе «почва-растительность/снежный покров-атмосфера» для периода вегетации (SVAT) и для холодного сезона года (SSNAT). Первые версии этих моделей были описаны в работах [2, 11] и затем усовершенствованы [4–6, 10]. Модели воспроизводят распределения влажности и температуры почвы по глубине в их динамике в период вегетации и в мерзлой почве в периоды ее промерзания и оттаивания, испарение с оголенной почвы и транспирацию влаги растительностью, временные изменения характеристик снежного покрова в периоды его формирования и таяния, а также температуры поверхности почвы, листьев и снежного покрова. Структура системы моделей, основные уравнения, используемые для описания процессов вертикального влаго- и теплопереноса в системе «почва–растительность/снежный покров–атмосфера», методы задания параметров и результаты проверок модели в целом и ее отдельных блоков детально освещены в вышеперечисленных публикациях.

Исследования проводились на примере сельскохозяйственного региона ЦЧО общей площадью 227300 км^2 (49°30′–54°00′ с.ш., 31°00′–43°00′ в.д.), включающего 7 областей РФ: Курскую, Белгородскую, Орловскую, Воронежскую, Липецкую, Тамбовскую и Брянскую. В регионе находятся 48 агрометеорологических станций, на которых производятся измерения метеорологических характеристик, влажности и температуры почвы под различными культурами, снегомерные наблюдения.

Значения большинства параметров моделей были получены по данным наблюдений на агрометеостанциях, а также специальных измерений при экспериментах или по литературным источникам.

Основные параметры модели SVAT были подобраны при калибровке по данным наземных наблюдений за испарением, влажностью и температурой почвы. Проверка модели на независимых данных производилась путем сравнения рассчитанных и измеренных вертикальных профилей влажности и температуры почвы, значений температуры подстилающей поверхности, радиационного баланса, содержания влаги в почве в разных по глубине ее слоях и суммарного испарения за многолетний период. Проверка показала [4, 5], что модель удовлетворительно описывает временной ход испарения, температуры и влажности почвы на агрометеорологических станциях исследуемого региона.

Калибровка основных параметров модели SSNAT для зимне-весенних сезонов и проверка модели на независимых данных производились на основе данных наземных наблюдений за высотой снежного покрова, вертикальными профилями влажности и температуры мерзлой почвы. Для калибровки блока формирования снежного покрова модели использовались данные измерений глубины снежного покрова на метеорологических станциях за зимне-весенние сезоны 2002-2004 гг. Проверка модели производилась по данным снегомерных измерений 2008-2010 гг. Сравнение результатов моделирования глубины снега с данными наземных измерений показало их удовлетворительное совпадение. Калибровка блока влаго- и теплопереноса в мерзлой почве модели SSNAT и его проверка производились по данным лабораторных измерений профилей температуры и влажности промерзающей и оттаивающей почвы в гидрофизической лаборатории Государственного гидрологического института и специальных натурных измерений на Нижнедевицкой воднобалансовой станции, на исследуемой территории. Детальное описание результатов калибровки и проверки этого блока приведено в работе [10].

Результаты проведенных испытаний показали, что разработанная модель позволяет удовлетворительно описывать гидротермический режим почвы, растительности и снежного покрова в пределах небольших однородных участков рассматриваемой территории, для которых данные измерений на агрометеорологических станциях могут считаться репрезентативными, а параметры и переменные модели могут быть заданы по имеющимся наблюдениям. Вместе с тем возможности описания гидротермичес-ких процессов на обширных участках территории, не освещенных наблюдениями, впрямую зависят от возможностей получения для этих участков оценок характеристик подстилающей поверхности, построенных по спутниковым данным, которые могут быть использованы в качестве основных параметров и переменных модели.

Моделирование водного режима территории с использованием данных спутниковых измерений

Использованные в настоящей работе спутниковые оценки параметров растительности и температуры подстилающей поверхности (ТПП) получены по данным измерений радиометров AVHRR и MODIS, установленных соответственно, на полярно-орбитальных спутниках серии NOAA и EOS Terra и Aqua, и радиометра SEVIRI геостационарного спутника «Meteosat–9». Эти оценки построены при использовании новых методов и технологий, разработанных специалистами НИЦ космической гидрометеорологии «Планета» (см., например, [7–9]). Спутниковые оценки характеристик снежного покрова получены с помощью методик, разработанных в NASA [12] на основе данных измерений радиометров MODIS/EOS Terra и Aqua и AMSR-E/Aqua. Методы и алгоритмы тематической обработки и анализа спутниковых данных радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/Terra и Aqua для построения оценок характеристик подстилающей поверхности (ПП) подробно описаны в [4-6]. По данным AVHRR при безоблачной атмосфере определялись температуры поверхностей растительного покрова T_a и почвы T_{sg}, эффективной радиационной ТПП $T_{s.eff}$ (средневзвешенной температур T_a и T_{sg}), и ее излучательной способности E, индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI, проективного покрытия растительностью B, а по данным MODIS – ТПП T_{ls}, E, NDVI и LAI. Для анализа достоверности полученных оценок статистика ошибок определения T_a, T_{sg} и $T_{s.eff}$ проанализирована путем сравнения с результатами наблюдений на агрометеостанциях региона. Среднеквадратические отклонения (СКО) для T_a, T_{sg} и $T_{s.eff}$ составили в рассматриваемые сезоны, соответственно, 2,3-2,7, 3,7-4,9 и 2,4-3,5°C. Оценки ТПП T_{ls}, NDVI, LAI и E по данным MODIS были построены с помощью специально разработанной технологии при использовании соответствующих файлов веб-сайта LP DAAC https://lpdaac.usgs.gov. Для T_{ls} были загружены продукты с пространственным разрешением 4,8 и 1 км. Пространственное разрешение оценок NDVI и LAI составляет 1 км, причем эти оценки получают за временной период в 8 дней. Достоверность оценок T_{ls} проверялась при их сравнении с данными синхронных пространственно совмещенных наземных агрометеорологических наблюдений, а также с аналогичными оценками по данным AVHRR. Для большинства сроков оценки T_{ls} с первым разрешением оказались более достоверны, чем со вторым. СКО оценок T_{ls}(MODIS) от значений температур, измеренных на агрометеостанциях, не превышали 3,5°C, а разности оценок T_{ls}(MODIS) и $T_{s.eff}$(AVHRR) лежали в диапазоне 2,0-4,0°C.

В 2009-2011 гг., после запуска в 2008 г. геостационарного метеоспутника Meteosat-9, в НИЦ «Планета» был разработан и тестирован оригинальный метод тематической обработки данных измерений радиометра SEVIRI для оценки ТПП T_{ls}, T_a и E в светлое и темное время суток [7-9]. Была проанализирована статистика отклонений оценок T_{ls}, построенных в НИЦ «Планета», от независимых спутниковых оценок T_{ls}(LSA SAF), полученных в LSA SAF – Прикладном спутниковом центре анализа данных о земной поверхности (Лиссабон, Португалия). Значения СКО для данных оценок получились равными 1,1-2,1°C. Поскольку погрешность оценок T_{ls}(LSA SAF) лежит в диапазоне 1,5-2,5°C, корректность оценок T_{ls} является вполне удовлетворительной. Достоверность оценок T_{ls}(SEVIRI) была исследована также путем сопоставления с оценками T_{ls}(MODIS) для исследуемой территории Центрально-Черноземной зоны за июль-август 2010 г. Значения СКО не превышали 3,5°C. Расхождения между T_{ls}(SEVIRI) и T_{ls}(MODIS) можно, по-видимому, объяснить их разным пространственным разрешением, несинхронностью и использованием различных процедур совмещения пар данных оценок. Разработана модель для построения по данным SEVIRI оценок температуры воздуха у поверхности растительного покрова T_a, принимавшихся за ее температуру. Расчет статистической погрешности использованной модели показал, что систематическое смещение равно нулю, а СКО – около 2^0C, что позволяет считать предложенный метод оценки T_a вполне достоверным.

Процесс моделирования с использованием спутниковых данных для исследуемой территории был организован следующим образом. Спутниковые оценки характеристик ПП и рассчитанные по модели значения температур T_f, T_g и T_s, суммарного испарения Ev, влагосодержания почвы W и других характеристик водного и теплового режимов были получены для уз-

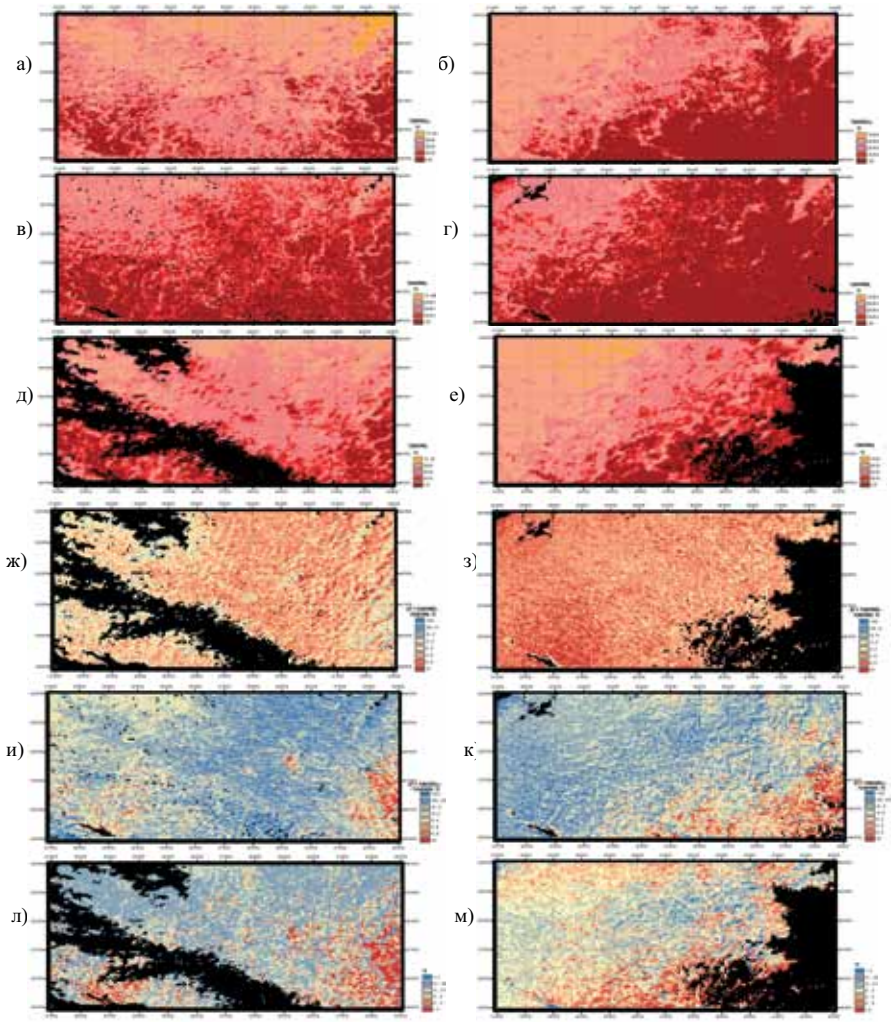


Рис. 1. *Температура подстилающей поверхности (ТПП), рассчитанная по модели по данным срочных трехчасовых наземных наблюдений T_s (а), (б), определенная по данным AVHRR $T_{s.eff}$(AVHRR) (в), (г) и SEVIRI T_{ls}(SEVIRI) (д), (е), и разности $T_{s.eff}$(AVHRR) – T_{ls}(SEVIRI) (ж), (з), T_s – $T_{s.eff}$(AVHRR) (и), (к), T_s – T_{ls}(SEVIRI (л), (м) для исследуемой территории площадью 227300 км^2 на 15 час. 01.06.2011 (а), (в), (д), (ж), (и), (л) и на 12 час. 29.08.2011 (б), (г), (е), (з), (к), (м) (время местное)*

лов регулярной сетки размером 3x3 пиксела (7x5 км^2), накладывавшейся на карту исследуемой территории (размер пиксела для ИК каналов радиометра AVHRR составляет 1′ по широте и 1,5′ по долготе, разрешение для аналогичных каналов MODIS равно 1 и 4,8 км, а для таких же каналов SEVIRI – 0,05° по широте и 0,06° по долготе – совмещение данных сеток производилось с помощью специально разработанных программ). По данным AVHRR производились оценки значений T_a, T_{sg}, $T_{s.eff}$, NDVI, E, B и LAI, по данным MODIS – оценки T_{ls} и LAI, по данным SEVIRI – оценки T_{ls}, T_a и E. Сопоставление значений модельных и спутниковых оценок ТПП при отсутствии облачности производилось для AVHRR и MODIS для нескольких дат каждого из сезонов вегетации 2008–2011 гг., а для SEVIRI – по трехчасовым интервалам для нескольких продолжительных безоблачных периодов сезонов вегетации 2009–2011 гг. Для большинства сроков каждого из рассматривавшихся сезонов разности значений $T_s - T_{s.eff}$, $(T_s - T_{ls})$, $T_f - T_a$ не превышали величин погрешностей оценки $T_{s.eff}$ и T_a по данным AVHRR. В качестве примера на рис. 1а-м для двух дат сезона вегетации 2011 г. представлены поля определенных по модели и по данным разных ИСЗ значений ТПП и их всевозможных разностей.

Наибольшие расхождения модельных, спутниковых и наземных оценок за отдельные сроки отмечаются в жаркие летние дни, они могут быть обусловлены локальным перегревом поверхности (разности температур второй половины дня и утра достигают 40 °С и больше), несовпадением моментов времени спутниковых и наземных измерений, а также естественной генерализацией спутниковых данных.

Разработка способов использования в модели SVAT спутниковых данных включала: 1) подтверждение корректности замены являющихся параметрами модели величин LAI и B, определенных по данным наземных наблюдений, на их спутниковые оценки; 2) разработку процедур учета в модели распределений по площади исследуемой территории спутниковых оценок LAI, B, ТПП и оценок интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха, построенных с помощью интерполяционных методов по сетевым наземным данным, путем ввода их значений в каждом узле вычислительной сетки; 3) введение в модель спутниковых оценок ТПП в качестве переменной при согласовании моментов времени спутниковых (AVHRR и MODIS) и наземных наблюдений или при использовании данных SEVIRI с высокой частотой измерений при их относительной непрерывности.

Итоговым результатом разработки модели SVAT, адаптированной к спутниковым оценкам LAI, B и ТПП, являлось проведение расчетов характеристик водного и теплового режимов исследуемой территории для нескольких сезонов вегетации при

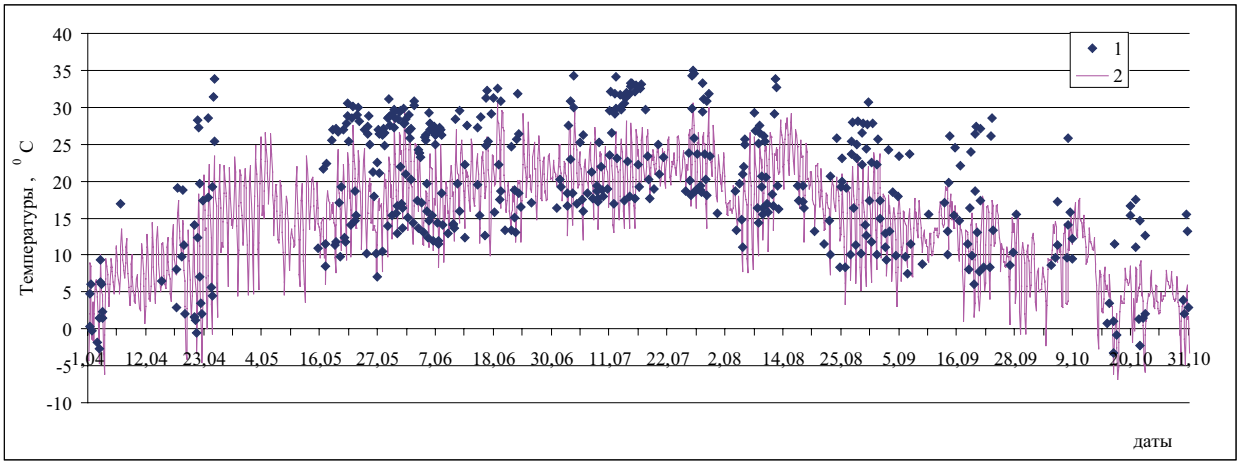
использовании этих оценок, построенных по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI.

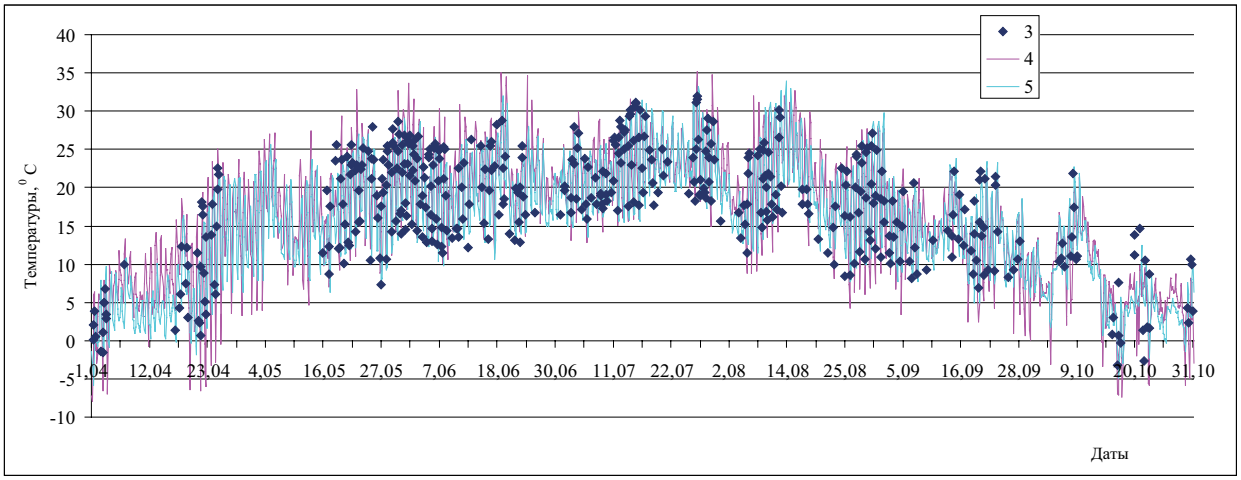
Замена значений параметров затенения LAI и B, задаваемых по данным наземных наблюдений, на их спутниковые оценки позволила получить адекватные оценки влагозапасов почвы W, суммарного испарения Ev и других гидрологических характеристик при переходе от агрометеостанций к территориям больших размеров. Выбор именно LAI и B среди разных параметров растительности и почв определялся их значительным влиянием на величины Ev и ТПП, а также возможностью построения их пространственных распределений по данным дистанционного зондирования. Допустимость такой замены проверялась напрямую – по результатам сопоставления временных ходов LAI за сезон вегетации, построенных по данным наземных измерений и данным AVHRR и MODIS, а также косвенно – путем сравнения модельных оценок T_f и T_s с их спутниковыми аналогами T_a и $T_{s.eff}$ (T_{ls}) [6]. В результате проведенных исследований показано, что для большинства дат расхождения значений LAI не превышают разброса его значений, обусловленного мелкомасштабной стохастической изменчивостью, а расхождения значений температур не превышали величин погрешности определения T_a и $T_{s.eff}$ по данным AVHRR за исключением периодов скашивания травяных культур и дней, характеризовавшихся местными перегревами поверхности почвы. Полученные расхождения могут быть обусловлены разной степенью генерализации спутниковых и наземных данных и несовпадением моментов времени их получения. Не выявило значимых различий и сравнение измеренных и рассчитанных при разных вариантах задания LAI и B величин влагозапасов почвы и суммарного испарения. Все описанные результаты позволяют считать модель SVAT пригодной для использования в ней в качестве параметров оценок LAI и B, полученных по данным разных спутников.

Эффективность описанного подхода была подтверждена, кроме того, путем сопоставления модельных оценок T_s и T_f с их спутниковыми аналогами $T_{s.eff}$ (T_{ls}) и T_a и данными наземных измерений ТПП, а также фактических и рассчитанных с помощью модели значений суммарного испарения и содержания влаги в метровом слое почвы.

Одним из способов использования в модели спутниковых данных является замена при расчетах вертикальных потоков влаги и тепла наземных оценок ТПП на спутниковые на каждом временном шаге. Корректность результатов моделирования при такой замене обеспечивается синхронностью наземных и спутниковых измерений ТПП, поскольку использование разновременных наземных и спутниковых данных из-за различий значений температур, обусловленных ее внутрисуточным ходом, может приводить к существенным расхождениям оценок составляющих водного и теплового балансов. Сказанное относится к данным AVHRR/NOAA и MODIS/EOS Terra и Aqua, получаемым дважды в день (при отсутствии облачности). Использование оценок ТПП по данным SEVIRI/Meteosat–9, получаемым каждые 15 минут и осредняемым по трехчасовым интервалам, снимает описанные затруднения, позволяя производить расчеты по модели с требуемым временным шагом. Для их проведения необходимо формировать ряд непрерывных измерений максимально большой продолжительности. Существенная проблема здесь (особенно для обширной территории) – невозможность построения длинных рядов из-за наличия облачности. Пример сравнения временных ходов переменных T_{ls}(SEVIRI) и T_s(MODEL) представлен на *рис. 2а*, а переменных T_a(SEVIRI) и T_f(MODEL), а также температуры воздуха на воднобалансовой станции Нижнедевицк представлен на *рис. 2б*. Приведенные результаты подтверждают приемлемость описанного подхода.

С помощью модели SVAT, включавшей описанные способы использования оценок LAI, B и ТПП по данным радиометров AVHRR, MODIS и SEVIRI, для сезонов вегетации 2008–2011 гг. были рассчитаны характеристики водного и теплового режимов исследуемой территории – суммарное испарение Ev, влагосодержание почвы W, инфильтрация воды в почву, поток влаги из ее верхнего метрового слоя в нижележащие горизонты, потоки скрытого LE и явного тепла и др. как в точке, так и в виде их распределений по площади исследуемого региона. Точность оценок Ev и W проверялась при сопоставлении с результатами измерений на агрометеостанциях, а также косвенно – путем сравнения их значений, рассчитанных для разных вариантов задания LAI, B и





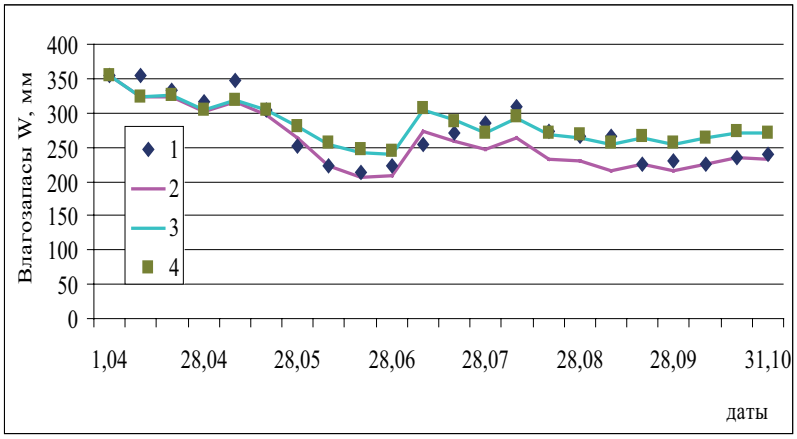


Рис.2. *Радиационная температура подстилающей поверхности T_{is}(SEVIRI) (1) и T_s(MODEL) (2) и температура поверхности растительного покрова T_a(SEVIRI) (3) и T_f(MODEL) (4), определенные по данным SEVIRI (1), (3) и рассчитанные по модели по данным срочных трехчасовых наземных наблюдений на воднобалансовой станции Нижнедевицк (2), (4) для сезона вегетации 2011 г. (5) – измеренная температура воздуха*

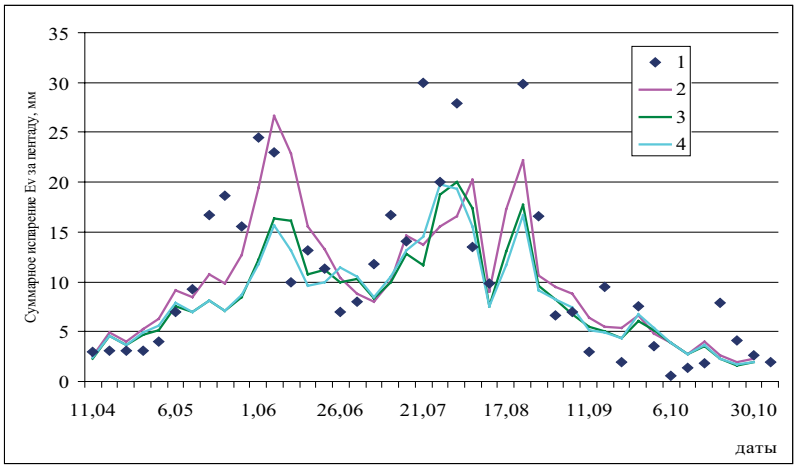


Рис. 3. *Значения суммарного испарения Ev за пентаду и влагозапасы почвы (в мм слоя) для сезона вегетации 2011 г.: измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1); рассчитанные по модели при оценках LAI по данным AVHRR для зерновых культур (2) и по данным MODIS (3) и (4) (при оценке температуры поверхности растительного покрова по данным срочных наземных измерений (3) и по данным SEVIRI (4))*

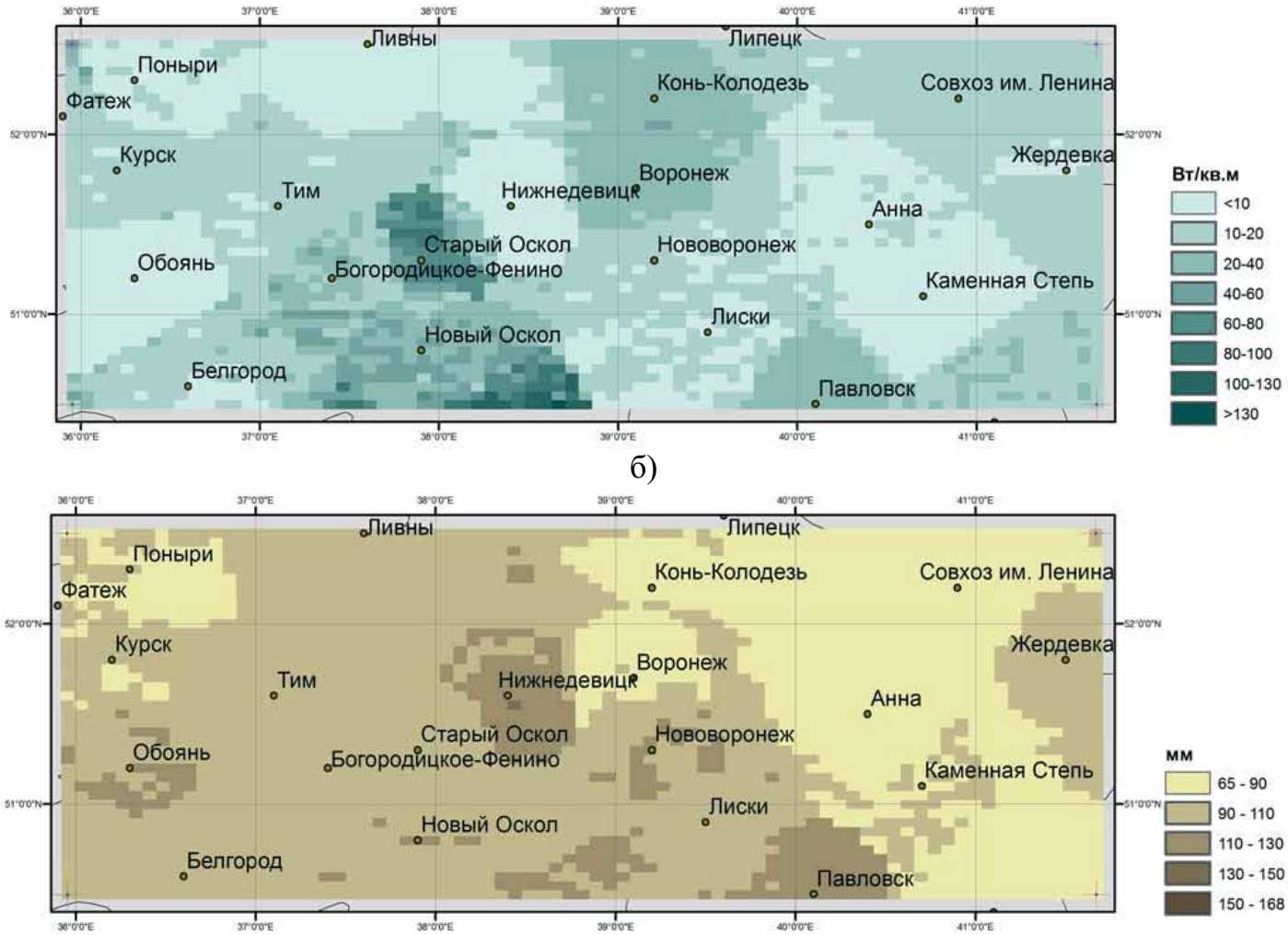


Рис. 4. *Поток скрытого тепла (Вт/(м²)) (вверху) и влагосодержание почвы (мм слоя) (внизу), рассчитанные по модели с использованием полученных по данным AVHRR распределений LAI, B и температуры подстилающей поверхности по территории части ЦЧР площадью 52800 км² для 28.07.2010 г*

ТПП по данным упомянутых сенсоров. На *рис. 3а* и *б*, соответственно, представлены результаты сравнения значений временных ходов величин Ev и W на воднобалансовой станции Нижнедевицк за сезон вегетации 2011 г. для нескольких вариантов расчетов.

Примеры распределения величин LE и W по части исследуемой территории площадью 52800 км² для одного из дней сезона вегетации 2010 г. приведены на *рис. 4*.

На *рис. 5а, б* представлены распределения по всей исследуемой территории потока скрытого тепла LE, рассчитанного с использованием оценок ТПП по наземным данным, и разность этого потока с рассчитанным при использовании данных SEVIRI. Погрешность значений Ev как для трехчасовых интервалов, так для суток и пентад для всех вариантов расчетов не превышала стандартной ошибки его оценки (~ 20 25 %). При этом отдельные выбросы могут получаться, например, за счет резкого увеличения транспирации после локальных выпадений осадков большой интенсивности, местных перегревов ПП в послеполуденные часы, которые не всегда фиксируются моделью, погрешностей оценок LAI, неточностей оценки ТПП. Аналогичное распределение построено и для величины W, при этом ошибки ее оценки для разных вариантов расчетов находились в пределах 10–15 %, что также является вполне приемлемым результатом.

Спутниковые оценки характеристик снежного покрова включались в модель в качестве дополнительной информации для уточнения расчета пространственного распределения характеристик снежного покрова и снеготаяния, водного и теплового режимов почвы в зимне-весенние сезоны 2002–2004 гг., 2009–2010 гг. Для моделирования полей снежного покрова применялась методика, предложенная в работе [3]. Точность оценок запаса воды в снеге по данным радиометрических из-

мерений заметно выше для сухого холодного снега, чем в период снеготаяния, поэтому расчеты по модели начинались с середины января, когда вся территория покрыта снегом, и сравнительно надежные в этот период спутниковые оценки снегозапасов использовались нами для задания начальных условий. Последующее накопление снежного покрова до начала снеготаяния моделировались в каждой ячейке (пикселе) расчетной сетки с использованием данных измерений на метеорологических станциях, интерполированных в расчетную ячейку. При имеющемся количестве станций ошибки интерполяции довольно велики, что может снизить качество моделирования динамики снежного покрова, особенно при его таянии. Для уточнения результатов моделирования в период снеготаяния и дополнительной настройки модели была разработана процедура усвоения ею спутниковых данных о покрытости территории снегом. На *рис. 6* в качестве иллюстрации возможностей модели представлены карты рассчитанных характеристик снежного покрова (снегозапасов и покрытости территории снегом) для разных дат зимне-весеннего сезона 2009 г., которые сравнивались с картами покрытости снегом на те же даты, построенными по спутниковым данным.

Как видно из приведенной иллюстрации, применение разработанной процедуры позволило с удовлетворительной точностью воспроизвести пространственное распределение заснеженных площадей в их динамике в период снеготаяния.

В результате проведенных исследований:

1. Разработана физико-математическая модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой, предназначенная для расчета характеристик водного и теплового режимов территорий регионального масштаба и позволяющая использовать спутниковые данные

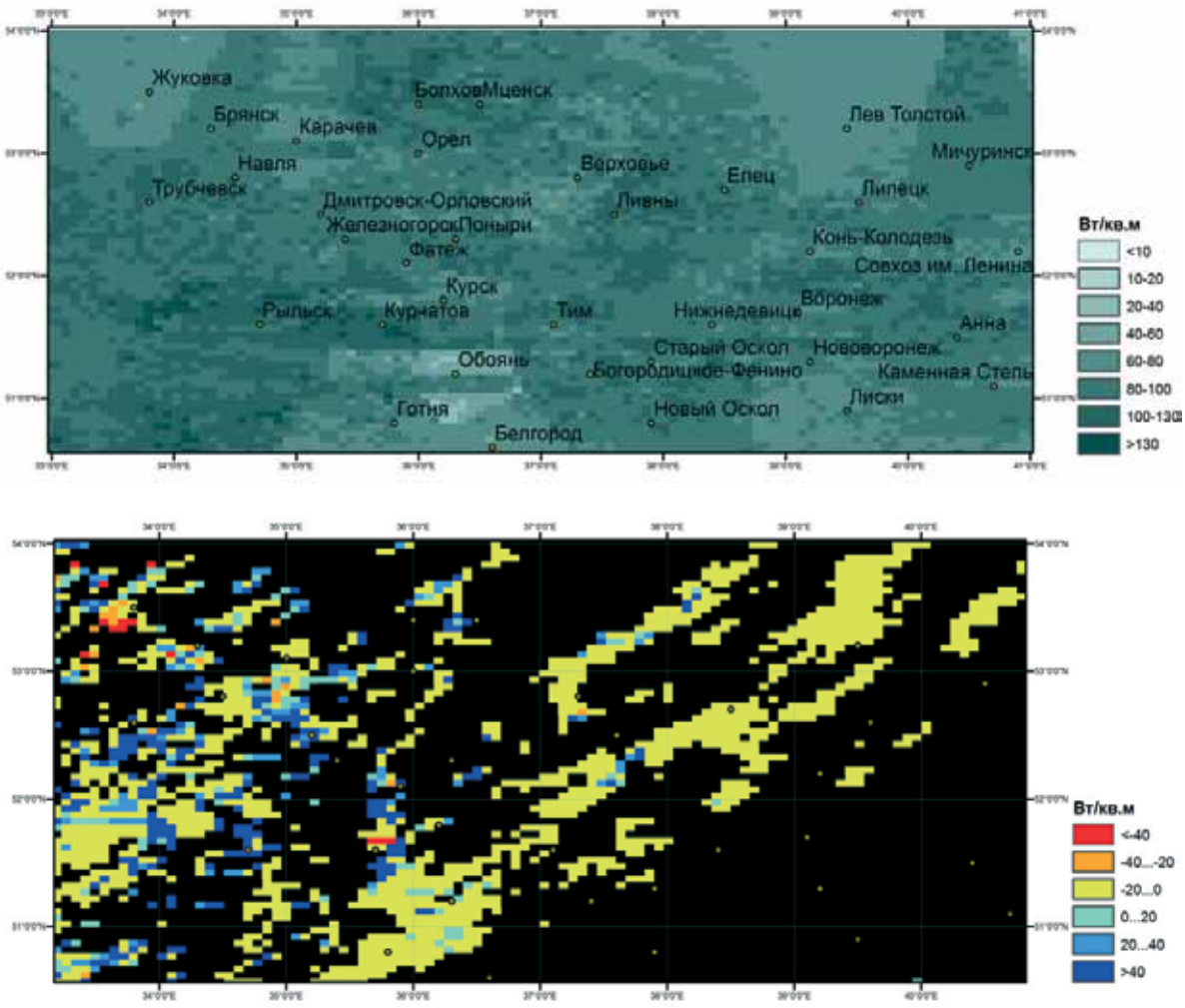


Рис. 5. *Поток скрытого тепла (Вт/м²)), рассчитанный по модели с использованием оценок температуры подстилающей поверхности по наземным данным (а) и его разность с потоком, рассчитанным с использованием оценок температуры по данным SEVIRI б) для территории Центрально-Черноземного региона Европейской части России на 12 ч. местного времени 05 июня 2010 г.*

о характеристиках подстилающей поверхности и снежного покрова.

2. Разработаны процедуры использования в модели оценок характеристик подстилающей поверхности, в том числе снежного покрова, построенных с помощью созданных технологий тематической обработки данных разных ИСЗ, при учете пространственной неоднородности полей этих оценок и значений метеорологических характеристик, определяемых по данным наземных наблюдений.
3. Показаны возможности оценки с помощью разработанных процедур характеристик водного и теплового режимов за четыре летних и зимних сезона для части территории Центрально-Черноземного региона Европейской России.

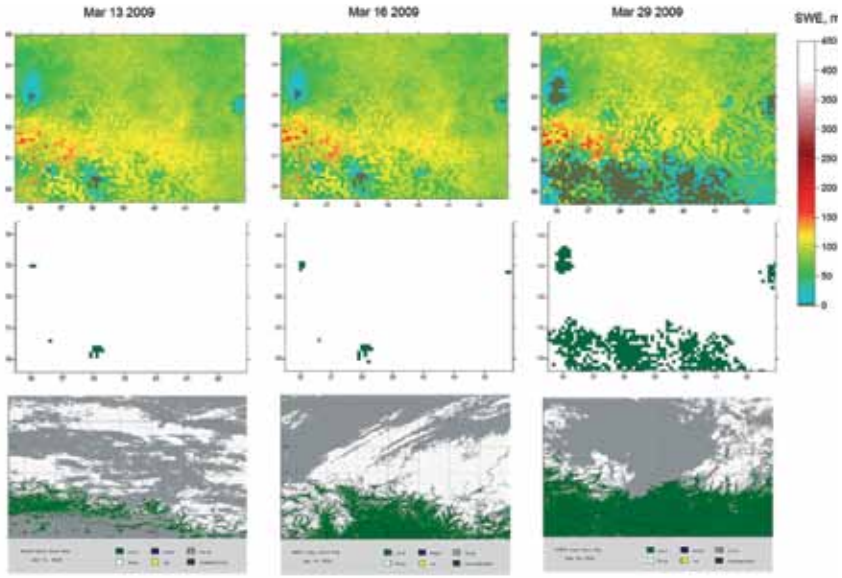


Рис. 6. *Карты рассчитанных характеристик снежного покрова (снегозапасов и покрытости территории снегом – верхние два ряда) и спутниковые данные о покрытости снегом в период снеготаяния 2009 года.*

Авторы выражают благодарность В.И. Соловьеву, Е.В. Волковой, А.В. Кухарскому и П.Ю. Романову за создание программного обеспечения и проведение тематической обработки спутниковых данных, а также М.В. Александровичу за обработку результатов моделирования снежного покрова.

Литература

1. ***Гусев Е.М., Насонова О.Н.***
Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. – М., Наука. – 2010. – 326 с.
2. ***Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Старцева З.П.***
Моделирование влагопереноса в системе почва-растительность-приземный слой атмосферы для гидрологических задач. // Водные ресурсы. – 1989. – № 2. – С. 32–39.
3. ***Кучмент Л.С., Романов П.Ю., Гельфан А.Н., Демидов В.Н.*** Оценка характеристик снежного покрова путем совместного использования моделей его формирования и спутниковой информации. // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 4. – С. 47–56
4. ***Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Старцева З.П.*** Использование спутниковой информации при моделировании вертикального тепло- и влагопереноса для речных водосборов // Исследование Земли из космоса. – 2005. – № 4. – С. 35–44.
5. ***Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П, Волкова Е.В.*** Моделирование гидрологического цикла речных водосборов с использованием синхронной спутниковой информации высокого разрешения // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 5. – С.68–82.
6. ***Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П, Волкова Е.В., Кухарский А.В.***
Моделирование составляющих водного и теплового балансов для речного водосбора с использованием спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 3. – С. 118–133.
7. ***Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А.***
Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ. // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 3. – С. 5–17
8. ***Соловьев В.И., Успенский С.А.***
Мониторинг температуры поверхности суши по данным геостационарных метеорологических спутников нового поколения. // Исследование Земли из космоса. – № 3. – 2009. – С. 79–89.
9. ***Успенский А.Б., Щербина Г.И.***
Оценка температуры и излучательной способности поверхности суши по данным измерений уходящего теплового излучения с ИСЗ NOAA. // Исследование Земли из космоса. – 1996. – № 5. – С. 4–13.
10. ***Gelfan A.N.***
Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parametrization by basic soil data. In: Predictions in Ungauged Basins: Promises and Progress. Proceedings of symposium S7 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguazu, Brazil, April 2005. – Eds: M. Sivapalan. – IAHS Publ. – № 303. – 2006. – P. 293–304.
11. ***Kuchment L.S., Gelfan A.N.***
The determination of the snowmelt rate and the meltwater outflow from a snowpack for modeling river runoff generation. // J. Hydrology. – 1996. – V. 179. – P. 23–36.
12. ***Romanov P., Gutman G., Csiszar I.***
Automated monitoring of snow over North America with multispectral satellite data. // Journal of Applied Meteorology. – 2000. – V. 39. – P. 1866–1880.

English

Modeling water regime of vast regions utilizing satellite data on land surface characteristics*

Eugene L. Muzylev – Ph.D., Leading Scientist of Water Problems Institute of RAS (WPI RAS) 3, Gubkina Str., 119333 Moscow, Russia State Research Center «Planeta»; 7, Bolshoy Predtechensky Str., 123242, Moscow, Russia e-mail: muzylev@aqua.laser.ru.

Alexander N. Gelfan – Dr. Sci., Deputy Director of WPI RAS, 3, Gubkina Str., 119333, Moscow, Russia State Research Center «Planeta»; 7, Bolshoy Predtechensky Str., 123242, Moscow, Russia e-mail: hydrowpi@aqua.laser.ru.

Zoya P. Startseva – Ph.D., Senior Scientist of WPI RAS, 3, Gubkina Str., 119333, Moscow, Russia, State Research Center «Planeta»; 7, Bolshoy Predtechensky Str., , 123242, Moscow, Russia e-mail: zoya@aqua.laser.ru.

Alexander B. Uspensky – Dr. Sci., Professor, Chief Scientist of the State Research Center «Planeta», 3, Gubkina Str., 119333, Moscow, Russia, State Research Center «Planeta»; 7, Bolshoy Predtechensky Str., , 123242, Moscow, Russia e-mail: uspensky@planet.iitp.ru.

Abstract

A physically based land surface model has been developed for simulating water and heat balance components of vast terrains of a regional scale and allowing the use of satellite-derived data on land surface and snow cover characteristics. Specific techniques have been developed to utilize in the model satellite-derived estimates of vegetation and snow cover characteristics. These estimates have been derived with the help of the developed methods of thematic processing measurement data of AVHRR/NOAA, MODIS/EOS Terra and Aqua, AMSR-E/EOS Aqua and SEVIRI/Meteosat-9. The results are presented of modeling vertical water and heat fluxes, soil and snow cover water and heat content, land surface and soil temperatures for 227300 km^2 area of the Central Black Earth zone of the European Russia for the period of 2008-2011.

Keywords: modeling, water regime, satellite data.

References

1. ***Gusev E.M., Nasonova O.N.*** Modelirovanie teplo- i vlagoobmena poverhnosti sushi s atmosferoj. [Modeling heat-and-moisture exchange between the land surface and the atmosphere.]– M., Nauka. – 2010. – 326 p.
2. ***Kuchment L.S., Motovilov Ju.G., Startseva Z.P.*** Modelirovanie vlagoperenosa v sisteme pochva-rastitel'nost'-prizemnyj sloj atmosfery dlja gidrologicheskih zadach. [Modeling moisture transfer in the system "soil-vegetation-surface layer of the atmosphere" for hydrological purposes]// Vodnye resursy. – 1989. – № 2. – p. 32–39.
3. ***Kuchment L.S., Romanov P.Ju., Gel'fan A.N., Demidov V.N.*** Ocenka harakteristik snezhnogo pokrova putem sovmestnogo ispol'zovanija modelej ego formirovanija i sputnikovoj informacii. [Evaluating the snow cover characteristics by using both models of its formation and satellite information]// Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2009. – № 4. – p. 47–56
4. ***Muzylev E.L., Uspenskij A.B., Volkova E.V., Starceva Z.P.*** Ispol'zovanie sputnikovoj informacii pri modelirovanii vertikal'nogo teplo- i vlagoperenosa dlja rechnyh vodosborov. [Using satellite information to model vertical heat and moisture transmission for river watersheds.] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2005. – № 4. – p. 35–44.
5. ***Muzylev E.L., Uspenskij A.B., Starceva Z.P, Volkova E.V.*** Modelirovanie gidrologicheskogo cikla rechnyh vodosborov s ispol'zovaniem sinhronnoj sputnikovoj informacii vysokogo razreshenija[Modeling the hydrologic cycle of river watersheds using synchronous satellite information of high resolution.] // Meteorologija i gidrologija. – 2002. – № 5. – p .68–82.
6. ***Muzylev E.L., Uspenskij A.B., Starceva Z.P, Volkova E.V., Kuharskij A.V.*** Modelirovanie sostavljajushhih vodnogo i teplovogo balansov dlja rechnogo vodosbora c ispol'zovaniem sputnikovyh dannyh o harakteristikah podstilajushhej poverhnosti. [Modeling constituents of water and heat balances for a river watershed using satellite data on the characteristics of the underlying surface.]// Meteorologija i gidrologija. – 2010. – № 3. – p. 118–133.
7. ***Solov'ev V.I., Uspenskij A.B., Uspenskij S.A.*** Opredelenie temperatury zemnoj poverhnosti po dannym izmerenij uhodjashhego teplovogo izluchenija s geostacionarnyh meteorologicheskih ISZ. [Land surface temperature determination using measurements of outgoing thermal emission from geostationary meteorological ESVs .]// Meteorologija i gidrologija. – 2010. – № 3. – p. 5–17
8. ***Solov'ev V.I., Uspenskij S.A.*** Monitoring temperatury poverhnosti sushi po dannym geostacionarnyh meteorologicheskih sputnikov novogo pokolenija. [Monotoring land surface temperature using new generation geostationary meteorological satellites.]// Issledovanie Zemli iz kosmosa. – № 3. – 2009. – p. 79–89.
9. ***Uspenskij A.B., Shherbina G.I.*** Ocenka temperatury i izluchatel'noj sposobnosti poverhnosti sushi po dannym izmerenij uhodjashhego teplovogo izluchenija s ISZ NOAA. [Evaluation of temperature and radiation capacity using measurements of outgoing thermal emission from earth satellite vehicles NOAA.] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 1996. – № 5. – p. 4–13.
10. ***Gelfan A.N.*** Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parametrization by basic soil data. In: Predictions in Ungauged Basins: Promises and Progress. Proceedings of symposium S7 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguazu, Brazil, April 2005. – Eds: M. Sivapalan. – IAHS Publ. – № 303. – 2006. – p. 293–304.
11. ***Kuchment L.S., Gelfan A.N.*** The determination of the snowmelt rate and the meltwater outflow from a snowpack for modeling river runoff generation. // J. Hydrology. – 1996. – V. 179. – P. 23–36.
12. ***Romanov P., Gutman G., Csiszar I.*** Automated monitoring of snow over North America with multispectral satellite data. // Journal of Applied Meteorology. – 2000. – V. 39. – p. 1866–1880.

* *The work was financially supported by RFBR (project № 10-05-00807a.).*

Моделирование стока рек северо-западной части России с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP*

Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.

На примере рек Онеги, Поноя и Туломы исследована возможность применения модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP в качестве инструментария воспроизведения многолетних рядов суточных гидрографов стока северных рек Европейской территории России. Информационное обеспечение модели основано на данных наблюдений метеорологических станций и глобальных базах данных.

Ключевые слова: гидрограф речного стока, взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью суши, физико-математическое моделирование, бассейны северных рек.

** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-05-00015).*

Количественная оценка и динамика разгрузки рек в Северный Ледовитый океан весьма важна в связи с той ролью, которую играет район высоких широт во взаимосвязи с климатом Земли и осуществляемой в этом регионе антропогенной деятельностью. Как полагают некоторые специалисты [1, 2], одним из факторов изменения климата могут быть и периодические изменения солености поверхностных вод Северного Ледовитого океана и Северной Атлантики.

В связи со сказанным возрастает роль и актуальность разработки моделей тепловлагообмена поверхности суши с атмосферой (в англоязычной литературе для подобных моделей используется аббревиатура LSM – Land Surface Model), которые могут быть использованы в качестве инструментария для оценки и прогноза речного стока. Цель настоящей работы – изучение возможностей применения в качестве такого инструментария разработанной в Лаборатории физики почвенных вод ИВП РАН LSM-модели SWAP. SWAP предполагается использовать для воспроизведения многолетних рядов суточного и месячного гидрографов стока ряда северных рек Европейской территории России (ЕТР).

Предварительные результаты построения методики моделирования гидрографа стока северных рек, основанной на использовании LSM-модели SWAP, изложены в [3-5], где читатель может легко с ними ознакомиться. Сама модель представлена в [6-9, 10, 11]. В ее основу положено физико-математическое описание процессов тепло- и влагообмена, происходящих в системе грунтовые воды – почва – растительный / снежный покров – приземный слой атмосферы. Поскольку описание модели SWAP и приложение ее к расчетам речного стока уже неоднократно приводилось в печати, перейдем сразу к характеристикам рассмотренных в настоящей работе объектов: бассейнов рек северного склона ЕТР, а именно рек Онеги, Поноя и Туломы.

ГУСЕВ Евгений Михайлович
доктор биологических наук, заведующий лабораторией Института водных проблем РАН.

НАСОНОВА Ольга Николаевна
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института водных проблем РАН.

ДЖОГАН Лариса Яковлевна
кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем РАН.

Географические объекты исследования и их схематизации

На *рис. 1* приведена карта-схема северного склона ЕТР, на которой выделены исследуемые авторами как в настоящей работе, так и в [3-5], бассейны северных рек с их гидрографической сетью. Отметим, что водосборная площадь указанных бассейнов составляет ~ 70% общей водосборной площади северного склона ЕТР. Для территорий этих бассейнов характерны избыточное увлажнение (средняя годовая сумма осадков колеблется от 500 до 750 мм), малое количество солнечной радиации, воздействие северных морей и относительно однообразные природные условия. Воздушные массы с Атлантики, приносящие облачность и осадки, в целом немного смягчают климат. Совокупность перечисленных факторов обуславливает короткое прохладное лето и длинную холодную зиму с устойчивым снежным покровом и промерзанием почвогрунтов. В отдельных районах имеются территории с многолетней мерзлотой. Реки показанных на рис. 1 бассейнов в основном имеют смешанное питание с преобладанием снегового. Их гидрографы стока отличаются высоким весенним половодьем, низкой зимней и летней меженью и относительно небольшими по объему стока осенними дождевыми паводками.

Почвенный покров бассейнов характеризуется в основном различными подзолами. Указанные выше реки обычно пересекают зоны тайги, лесотундры и тундры. В лесной зоне (занимающей, как правило, большую часть бассейнов) преобладает хвойная растительность с примесью березы, осины, ивы, ольхи.

Для проведения модельных расчетов стока выбранных рек была использована схематизация их бассейнов в виде совокупности ячеек пространственной сетки с разрешением $1^0 x 1^0$ *(рис. 1)*, соединенных гидрографической сетью. Для каждой ячейки рассчитывалась ее площадь, определяющая общее стокообразование ячейки. Результаты расчетов стока рек Мезени, Печоры и Северной Двины [3-5], а также исследования, проведенные (при участии авторов статьи) в международном проекте Rhone-Aggregation LSM intercomparison [12] дали основание полагать, что использование расчетной сетки с одноградусным пространственным разрешением не приведет к значительным погрешностям в результатах моделирования речного стока с суточным или месячным шагом с рассматриваемых в настоящей работе бассейнов. Пример схематизации бассейна одной из выбранных рек, а именно р. Туломы, представлен на *рис. 2.*

При схематизации бассейн р. Онеги (створ Порог) представлен совокупностью девяти ячеек, бассейн р. Поноя (створ Каневка) – четырех ячеек, бассейна р. Туломы (створ Верхнетуломская ГЭС) – пяти ячеек. Разное количество ячеек обусловлено различием в площадях бассейнов исследуемых рек от 15,5 (бассейн р. Поноя) до 55,7 тыс. км^2 (бассейн р. Онеги).

Информационное обеспечение расчетов стока северных рек

Необходимое при проведении расчетов информационное обеспечение LSM-моделей (в том числе и SWAP) включает в себя приземную метеорологическую информацию (температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, атмосферные осадки, а также значения приходящих потоков длинно- и коротковолновой радиации) с разрешением < 1 сут (обычно 3 или 6 ч) и параметры подстилающей поверхности, а именно: параметры почвы, растительного покрова, топографические данные бассейна. Метеорологические характеристики могут быть получены из данных наблюдений метеорологических станций или из глобальных баз данных, основой которых служат, как правило, результаты так называемого реанализа [10, 13] или продукты их «гибридизации» с данными наземных и дистанционных наблюдений [10, 14]. Параметры почвы и растительности могут быть либо измерены непосредственно, либо получены на основе других измеренных характеристик, либо оценены приближенно по имеющимся в литературе таблицам с использованием информации о типах почвы и растительности. Альтернативой этому могут служить глобальные базы данных по параметрам подстилающей поверхности с различным пространственным разрешением.

В настоящей работе авторы ограничились одним источником исходной метеорологической информации – данными наблюдений метеорологических станций (при этом значения приходящих потоков коротковолно-

вой и длинноволновой радиации рассчитывались по данным стандартных метеорологических измерений по методике, приведенной в [15, 16]).

Для бассейна р. Онеги были использованы результаты наблюдений нескольких достаточно равномерно распределенных по территории метеорологических станций, в то время как для каждого из бассейнов рек Поноя и Туломы оказались пригодными данные наблюдений лишь одной станции (причем для р. Туломы метеостанция оказалась за пределами бассейна). Поэтому в двух последних случаях значения метеорологических характеристик брались одинаковыми для всех ячеек соответствующего бассейна. Для р. Онеги интерполяция значений метеорологических элементов в центры расчетных ячеек бассейна осуществлялась с использованием процедуры кригинга [4].

Параметры растительного покрова, почвы и топографии бассейнов, также как и в [3-5], были взяты из глобальных баз данных. При создании базы данных растительного покрова, адаптированной под модель SWAP, за основу была принята глобальная база данных из проекта Second Global Soil Wetness Project (GSWP-2) [10, 14, 17]. При этом использовалась классификация типов подстилающей поверхности International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), включающая в себя 17 типов поверхности суши. База данных была скорректирована для устранения грубых несоответствий и ошибок, а также дополнена рядом специфических параметров, необходимых при работе с моделью SWAP. Подробности указанной корректировки изложены в [10]. Там же содержится и перечень параметров растительного покрова, используемых в модели SWAP.

При подготовке адаптированной под модель SWAP базы данных по почвенным параметрам за основу были приняты данные из информационной базы International Satellite Land-Surface Climatology Project

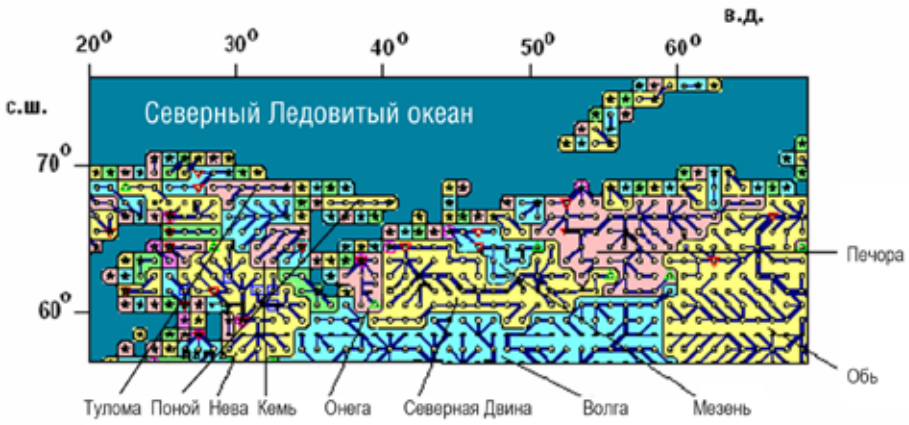


Рис.1. Схематизация речных бассейнов и гидрографической сети Российской Европейской части пан–Арктического бассейна

а)

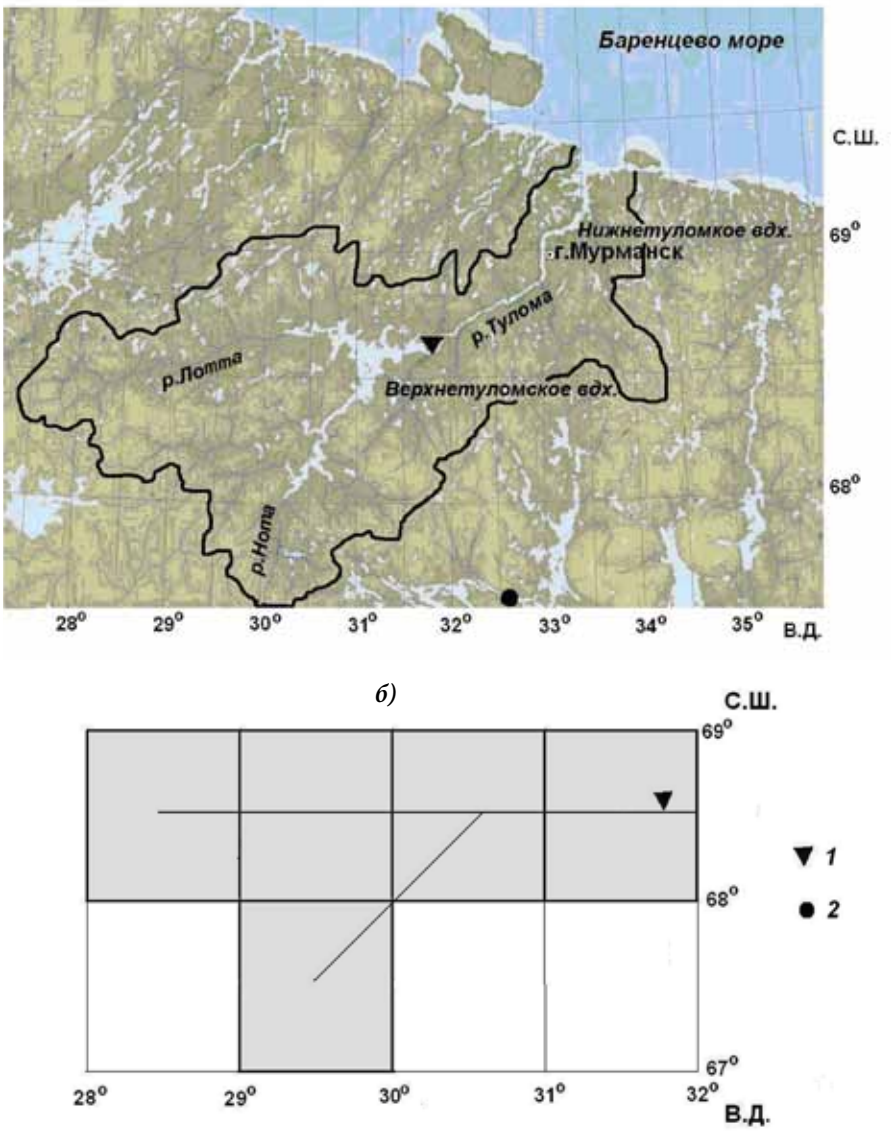


Рис. 2. *Бассейн р. Тулома (а)*
и его схематизация с гидрографической сетью до створа Верхнетуломская (б).
1 – створ Верхнетуломская, 2 – метеорологическая ***станция***

Initiative II (ISLSCP-II) / GSWP-2, которые, в свою очередь, взяты из IGBP-DIS (Data Information System). Указанные данные также были частично скорректированы в целях устранения неправдоподобных значений ряда параметров и согласования их между собой и с параметрами растительного покрова [10].

Для последней группы данных – топографических характеристик, включающих в себя среднюю высоту ячейки расчетной сетки и углы наклона поверхности ячейки в меридиональном и широтном направлениях, высоты, необходимые для расчетов трансформации стока в пределах расчетной ячейки были взяты из информационной базы Центра данных по системам наблюдений за ресурсами Земли Earth Resources Observation Systems Data Center (EDC), углы наклона были рассчитаны по данным о средних высотах соседних ячеек.

Полученное в результате информационное обеспечение, как правило, бывает разнородно по точности, надежности и достоверности в отношении различных групп данных. Поэтому для повышения качества результатов расчетов стока необходима оптимизация ряда модельных параметров, в наибольшей степени влияющих на формирование стока.

Особенности оптимизации основных модельных параметров

Набор характерных для водосборов северных рек параметров, подлежащих оптимизации, был определен и использован в [4]. Здесь лишь отметим, что последние могут включать в себя, наряду с характеристиками подстилающей поверхности, корректирующие множители для осадков и приходящей радиации. Корректирующие множители для осадков могут использоваться в расчетах в случаях ненадежности информации, что может быть связано с редкой сетью осадкомеров, значительными пропусками в рядах наблюдений, а также неточностью измерения осадков, особенно зимних (причины, обуславливающие указанную неточность, обсуждались в работе [3]). Что касается корректирующих множителей к приходящей радиации, то их введение связано с тем, что значения радиации, как правило, рассчитываются и, следовательно, неизбежно содержат ошибки расчета.

Для северных рек число оптимизируемых в [3-5] параметров не превышало 11: 8 параметров подстилающей поверхности бассейна и 3 или 4 корректирующих множителя к метеоэлементам (к жидким и твердым осадкам, к коротковолновой и длинноволновой радиации). К оптимизируемым параметрам подстилающей поверхности для каждой ячейки относились, в частности, корректирующие множители (общие для всего бассейна) к значениям коэффициента фильтрации почвы K_0, толщины корнеобитаемого слоя h_r и альбедо подстилающей поверхности в теплый (бесснежный) и холодный (когда подстилающая поверхность суши покрыта снегом) периоды года, обозначенные k_{K0}, k_{hr} и k_{albsum}, и k_{albwin} соответственно. Кроме того, принималось, что для каждой ячейки расстояние от поверхности почвы до глубины практически водонепроницаемого слоя $h_0 = k_{h0} h_r$, где k_{h0} – множитель, общий для всего бассейна, который также калибровался. Наконец, калибровались такие параметры как альбедо свежевыпавшего снега alb_{sn}, коэффициент шероховатости n в формуле Маннинга и эффективная скорость движения воды в русле u_e. В данной работе для Онеги и Поноя калибровалось 8 параметров подстилающей поверхности, в то время как для Туломы по причине указанного выше недостаточного метеорологического обеспечения калибровалось 11 параметров.

Калибровка модельных параметров для выбранных бассейнов проводилась с использованием метода глобального поиска экстремума SCE-UA [18] по значениям суточного речного стока, измеренного на соответствующей стоковой станции за 5-летний период. При этом ставилась задача не только достижения максимума целевой функции, в качестве которой использовалась эффективность расчета суточного стока по Нэшу и Сатклиффу [19] *Eff*, но также и соблюдения условия, что систематическая ошибка расчетов не должна превышать 5%.

Оценка результатов моделирования

Полученные оптимальные значения параметров использовались для расчетов суточных значений стока для выбранных рек за периоды, обычно значительно превышающие периоды калибровки *(табл. 1)*. При этом необходимо отметить, что р. Тулома (в отличие от рек Онега и Поной) с 1963–1964 гг. стала сильно зарегулированной в силу создания на месте оз. Нотозера *(рис. 2)* Верхнетуломско-

го водохранилища, осуществляющего многолетнее регулирование стока и увеличившего площадь водного зеркала озера почти в 10 раз. Поэтому все расчеты для р. Туломы были проведены за период до 1962 г.

Оценка полученных при моделировании результатов осуществлялась по трем статистическим критериям соответствия рассчитанных и измеренных суточных значений стока: систематической ошибке Bias, равной разности между рассчитанными и измеренными средними значениями стока, коэффициенту корреляции *Corr* и эффективности расчета *Eff*. Здесь уместно вспомнить, что при разработке методик прогнозов стока принята следующая шкала оценки их точности [20]: «хорошая» точность при $Eff \geq 0{,}75$ и «удовлетворительная» при $0{,}36 < Eff < 0{,}75$.

На рис. 3 приведены примеры сопоставления рассчитанных с использованием оптимизированных параметров и измеренных гидрографов суточного стока рек Онега, Поной и Тулома за ряд лет. В *табл. 1* даны статистические характеристики сопоставления измеренного и рассчитанного суточных стоков как для этих рек, так и, в целях большей иллюстративности работоспособности модели, для рек, исследованных в работах [3-5], входной гидрометеорологической информацией для которых также были данные наблюдений соответствующих метеорологических станций.

Приведенные на рис. 3 и в табл. 1 результаты свидетельствуют о том, что качество расчета гидрографов стока можно признать хорошим. Что касается эффективности расчетов *Eff*, то ее значение попадает в диапазон «хорошо» для пяти рек. Исключение составляет р. Тулома, для которой значение *Eff* имеет оценку «удовлетворительно» (то же можно сказать и о коэффициенте корреляции). Однако последнее не удивительно, если вспомнить о качестве метеорологического обеспечения р. Туломы (рис. 2).

Что касается значения $|Bias|$, то в основу оценки качества моделирования стока с использованием этого критерия могут быть положены соображения о том, что систематическая ошибка суточных, месячных и годовых значений измеренного речного стока составляет в среднем не менее 5% [21] (для периодов половодья ошибка измерения стока может быть существенно выше). Полагая, что и ошибка расчета должна быть не меньше этого значения, а также что ошибки измерения и расчета независимы, приходим к выводу, что абсолютное значение систематического отклонения измеренных и рассчитанных величин $|Bias|$ при «хорошем» воспроизведении стока не должно превышать ~7%. Таким образом, верхняя граница диапазона «хороших» значений $|Bias|$ определяется в 7%. Приведенные в табл. 1 данные по $|Bias|$ для стока основных рек северного склона ЕТР показывают, что такому критерию удовлетворяют 5 рек из 6. Для р. Онеги значения $|Bias|$ немного больше, что можно признать удовлетворительным.

Таким образом, результаты, полученные как в настоящей работе, так и в [3-5], показывают, что использование модели тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP в сочетании с информационным обеспечением, основанным на глобальных базах данных по параметрам подстилающей

Таблица 1. *Статистические характеристики соответствия (для расчетного периода) измеренных и рассчитанных суточных слоев стока основных рек северного склона ЕТР: систематическая ошибка Bias, %; эффективность расчета Eff и коэффициент корреляции Corr*

Река	Площадь**, км²	Калибровочный период, годы	Расчетный период, годы	Bias, %	Eff	Corr
Печора*	312000	1981–1985	1981–2000	–7	0,81	0,91
Мезень*	56400	1986–1990	1986–1994	–3	0,84	0,92
Северная Двина	348000	1986–1990	1967–1998	0	0,85	0,92
Онега	55770	1986–1990	1967–1997	–10	0,83	0,92
Поной	10200	1970–1974	1967–1984	–5	0,85	0,90
Тулома*	17500	1940–1944	1938–1962	–3	0,60	0,83

** – при оптимизации модельных параметров калибровались корректирующие множители к осадкам и приходящей радиации;*
*** – дренажная площадь водосбора до створа измерения стока.*

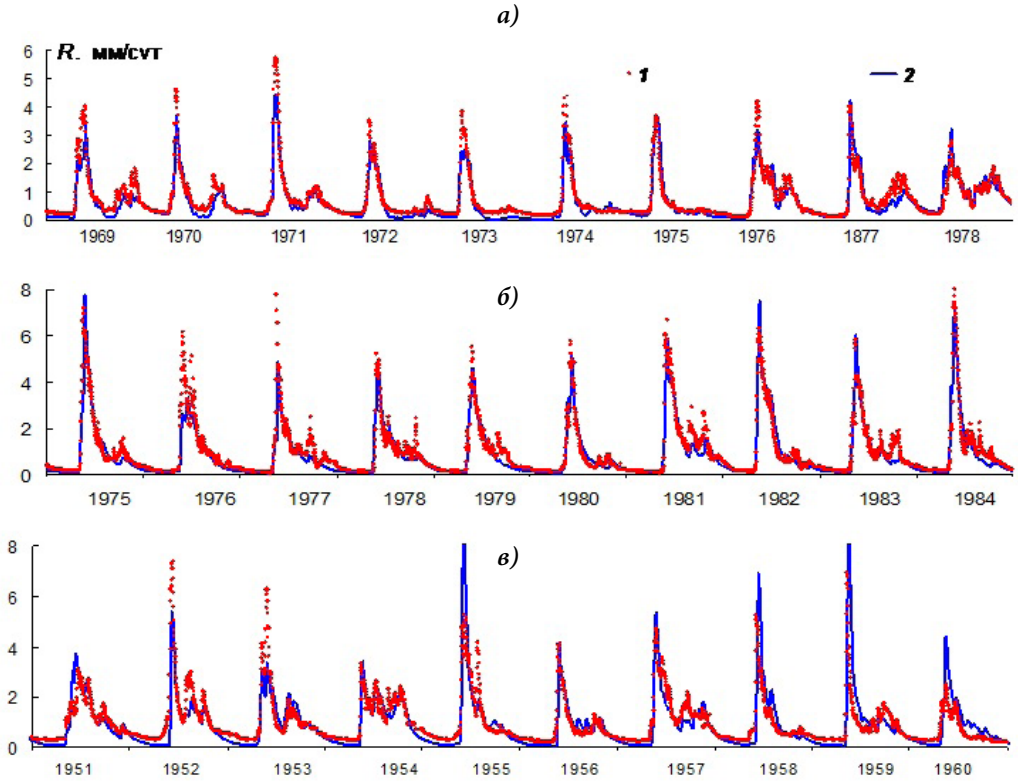


Рис.3. *Примеры измеренных (1) и рассчитанных на основе модели SWAP (2) гидрографов суточного стока R рек Онеги (а), Поноя (б) и Туломы (в)*

поверхности и на данных наблюдений метеорологических станций, при проведении оптимизации нескольких модельных параметров позволяет достаточно хорошо воспроизводить сток рек северного склона ЕТР.

Литература

1. ***Апполов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.***
Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат. – 1974. – 366 с.
2. ***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.
3. ***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. 733–748.
4. ***Гусев Е.М., Насонова О.Н.***
Параметризация процессов тепловлагообмена в бореальных лесных экосистемах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. – Т. 37, № 2. – С. 182–200.
5. ***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.
6. ***Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.***
Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // Вод. ресурсы. – 2006. – Т. 33, № 2. – С. 133–145.
7. ***Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.***
Воспроизведение гидрографов стока р. Печоры на основе модели тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 186 – 198.
8. ***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.
9. ***Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э.***
Моделирование стока р.Северной Двины с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP и глобальных баз данных // Вод. ресурсы. – 2011. – Т.38, № 4.
10. ***Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э.***
Моделирование составляющих теплового и водного балансов поверхности суши земного шара // Вод. ресурсы. – 2006. – Т. 33, № 6. – С. 664–676.
11. ***Boone A., Habets F., Noilhan J. et al.***
The Rhone-aggregation land surface scheme intercomparison project: An overview // J. Climate. – 2004. – V. 17. – P. 187–208.
12. ***Dirmeyer P., Gao X., Oki T.***
The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan // IGPO Publ. Series. Silver Spring: International –GEWEX Project Office. – 2002. –№ 37. – 75 p.
13. ***Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.K.***
Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models // Water Resour. Res. – 1992. – V. 28, № 4. – P. 1015–1031.
14. ***Gusev Ye.M., Nasonova O.N.***
The simulation of 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. ***Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al.***
NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2002. – V. 83. – P. 1631–1648.
16. ***Manabe S., Stouffer R.J.***
Century-scale effects of increased atmospheric CO2 on the ocean-atmosphere system // Nature. – 1993. – V. 364, № 6434. – P. 215–218.
17. ***Nash J.E., Sutcliffe J.V.***
River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // J. Hydrol. – 1970. – V. 10, № 3. – P. 282–290.
18. ***Shmakin A.B.***
The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // Global Plan. Change. – 1998. – V. 19, № 1–4. – P. 49–62.
19. ***Stocker T.F., Schmittner A.***
Influence of CO2 emission rates on the stability of the thermohaline circulation // Nature. – 1997. – V. 388, № 6645. – P. 862–865.
20. ***WMO, 1994.***
Guide to hydrological practices. WMO-No.168. – Geneva:World Meteorological Organization, 1994. – 738 p.
21. ***Zhao M., Dirmeyer P.***
Production and Analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets // COLA Technical Report. Calverton: Center for Ocean–Land–Atmosphere Studies. – 2003. – № 159. – 38 p.

English

Simulation of river runoff in the north-western part of Russia using the land surface model SWAP *

Yeugeniy M. Gusev –
Doctor of Biology, Head of the Laboratory of the Institute of Water Problems RAS, 4, Gubkina St., Moscow, 119333, Russia
e-mail: sowaso@yandex.ru.

Olga N. Nasonova–
Candidate of Technical Sciences, leading research scientist at the Institute of Water Problems RAS, 4, Gubkina St., Moscow, 119333, Russia
e-mail: nasonova@aqua.laser.ru.

Larissa Y. Dzhogan –
Candidate of Geographical Sciences, senior research scientist at the Institute of Water Problems RAS, 4, Gubkina St., Moscow, 119333, Russia
e-mail: ldzhogan@gmail.com.

Abstract

On the example of the Onega, Ponoi and Tuloma rivers, the possibility of applying the SWAP model of interaction of the land surface with the atmosphere as an instrument of simulation of long term series of daily streamflow hydrographs of the Northern rivers of European Russia is shown. Informational support of the model is based on the observation data of meteorological stations and global databases on the land surface parameters.

Keywords: the river streamflow hydrograph, interaction of the atmosphere with the land surface, physically-based modeling, Northern river basins.

References

1. ***Appolov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D.***
Kurs gidrologicheskih prognozov. [Course of hydrological forecasts] L.: Gidrometeoizdat. – 1974. – 366 p.
2. ***Gusev E.M., Nasonova O.N.***
Parametrizacija teplo- i vlagoobmena na poverhnosti sushi pri soprjazhenii gidrologicheskih i klimaticheskih modelej. [Parameterization of heat-and-moisture exchange on the land surface with coupling the hydrological and the climatic models]// Vod. resursy. – 1998. – T.25, № 4. – p. 421–431.
3. ***Gusev E.M., Nasonova O.N.***
Parametrizacija processov teplovlagoobmena v sisteme «gruntovye vody–pochva–rastitel'nyj/snezhnyj pokrov–atmosfera» dlja territorij s chetko vyrazhennoj sezonnoj izmenchivost'ju klimata.[Parameterization of heat-and-moisture exchange in the system "subsoil water-soil- plant/snow cover-atmosphere" for territories with distinct seasonality of climate].// Pochvovedenie. – 2000. – № 6. – p 733–748.
4. ***Gusev E.M., Nasonova O.N.***
Parametrizacija processov teplovlagoobmena v boreal'nyh lesnyh jekosistemah. [Parameterization of heat-and-moisture exchange in boreal forest ecosystems].// Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana. 2001. – T. 37, № 2. – p. 182–200.
5. ***Gusev E.M., Nasonova O.N.***
Modelirovanie processov teplovlagoobmena sushi s atmosferoj v lokal'nom masshtabe dlja territorij s mnogoletnej merzlotoj. [Modeling the processes of heat-and-moisture exchange between the land and the atmosphere on a local scale for territories with permafrost]. // Pochvovedenie. – 2004. – № 9. – p. 1077–1092.
6. ***Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ja.***
Modelirovanie stoka na malyh vodosborah v zone mnogoletnej merzloty na osnove modeli SWAP. [Modeling the runoff for small watersheds in the zone of permafrost, based on the SWAP mode]. // Vod. resursy. – 2006. – T. 33, № 2. – p. 133–145.
7. ***Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ja.***
Vosproizvedenie gidrografov stoka r. Pechory na osnove modeli teplovlagoobmena podstilajushhej poverhnosti sushi s atmosferoj SWAP [Reproduction of hydrographs of the river Pechora runoff based on the model of heat-and-moisture exchange between the underlying land surface and atmosphere SWAP mode.]// Vod. resursy. 2010. T. 37. № 2. p. 186 – 198.
8. ***Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ja., Kovalev E.Je.***
Ispol'zovanie modeli vzaimodejstvija podstilajushhej poverhnosti sushi s atmosferoj dlja raschetov rechnogo stoka v vysokih shirotah. [Using the model of interaction between the underlying land surface and atmosphere for river runoff calculations in high latitudes].// Vod. resursy. – 2008. – T. 35, № 2. – S.181–195.
9. ***Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ja., Kovalev E.Je.*** Modelirovanie stoka r.Severnoj Dviny s ispol'zovaniem modeli vzaimodejstvija poverhnosti sushi s atmosferoj SWAP i global'nyh baz dannyh [Modeling the runoff of the Severnaya Dvina river using the SWAP model of interaction between the land surface and the atmosphere as well as global databases].// Vod. resursy. – 2011. – T.38, № 4.
10. ***Gusev E.M., Nasonova O.N., Kovalev E.Je.***
Modelirovanie sostavljajushhih teplovogo i vodnogo balansov poverhnosti sushi zemnogo shara [Modeling constituent parts of heat and water balances of the land surface of the Earth].// Vod. resursy. – 2006. – T. 33, № 6. – p. 664–676.
11. ***Boone A., Habets F., Noilhan J. et al.***
The Rhone-aggregation land surface scheme intercomparison project: An overview // J. Climate. – 2004. – V. 17. – P. 187–208.
12. ***Dirmeyer P., Gao X., Oki T.***
The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan // IGPO Publ. Series. Silver Spring: International –GEWEX Project Office. – 2002. –№ 37. – 75 p.
13. ***Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.K.***
Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models // Water Resour. Res. – 1992. – V. 28, № 4. – P. 1015–1031.
14. ***Gusev Ye.M., Nasonova O.N.***
The simulation of 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. ***Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al.***
NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2002. – V. 83. – P. 1631–1648.
16. ***Manabe S., Stouffer R.J.***
Century-scale effects of increased atmospheric CO2 on the ocean-atmosphere system // Nature. – 1993. – V. 364, № 6434. – P. 215–218.
17. ***Nash J.E., Sutcliffe J.V.***
River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // J. Hydrol. – 1970. – V. 10, № 3. – P. 282–290.
18. ***Shmakin A.B.***
The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // Global Plan. Change. – 1998. – V. 19, № 1–4. – P. 49–62.
19. ***Stocker T.F., Schmittner A.***
Influence of CO2 emission rates on the stability of the thermohaline circulation // Nature. – 1997. – V. 388, № 6645. – P. 862–865.
20. ***WMO, 1994.***
Guide to hydrological practices. WMO-No.168. – Geneva:World Meteorological Organization, 1994. – 738 p.
21. ***Zhao M., Dirmeyer P.***
Production and Analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets // COLA Technical Report. Calverton: Center for Ocean–Land–Atmosphere Studies. – 2003. – № 159. – 38 p.

* *The work was financially supported by RFBR (project № 11-05-00015).*

Физические основы гидрологических и морфологических процессов в речных дельтах*

Михайлов В.Н., Михайлова М.В.

Рассмотрены физические основы гидрологических и морфологических процессов в речных дельтах. Определены типы дельт и процессов дельтообразования. Описаны закономерности гидравлического сопряжения реки и моря в дельтах и влияния подпора со стороны моря и штормовых нагонов на режим дельт, распределения стока по рукавам. Рассмотрены причины и типы русловых процессов в дельтах, закономерности баланса наносов и выдвижения или отступания дельт.

Ключевые слова: река, море, дельта, сток, подпор, нагон, русловые процессы, выдвижение или отступание дельты

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 11-05-00199, 13-05-00141).*

Дельта реки – это сформированная из речных (а также частично морских или озерных) наносов низменность в пределах устьевой области реки, имеющая сложную и изменчивую гидрографическую сеть (комплекс водотоков и водоемов) и специфический «дельтовый» ландшафт. Материальной основой дельты служит подверженная воздействию руслового потока верхняя часть устьевого конуса выноса и аллювиальная дельтовая пойма (дельтовая равнина), в формировании которой заметную роль играет почвенно-растительный покров (Михайлов и др., 1986).

Приведенное выше определение дельты базируется на гидрографо-геоморфологическом подходе к понятию «дельта». Классическими в этом отношении можно считать два определения дельты. Первое – Ч. Лайелла, который впервые в 1830–1850-х гг. ввел этот термин в геологическую науку: «дельта – это аллювиальная суша, сформированная рекой в ее устье, вне зависимости от ее точной формы» (Deltas – models…, 1975). Второе (более полное) определение принадлежит И.С. Щукину (1974): дельта – это «низменность в низовьях реки, сложенная речными наносами и расчлененная разветвленной сетью рукавов и протоков». Сходные определения дельты приводятся во многих как гидрологических, так и геоморфологических работах.

Речные дельты, занимающие особое географическое положение между бассейнами рек и приемными водоемами (океанами, морями, озерами) и обладающие большими природными ресурсами (земельными, водными биологическими и др.) с давних времен были местами, где селились люди, возникали города и порты.

В современных условиях крупномасштабных изменений климата и водохозяйственной деятельности в речных бассейнах дельты становятся одними из самых уязвимых природных объектов на Земле. В XXI в. именно речные дельты могут подвергнуться неблагоприятному воздействию прогнозируемого повышения уровня Мирового океана и связанных с ним внутренних и окраинных морей, а также антропогенному изменению стока рек (Михайлов, Михайлова, 2003; 2010; Climate Change, 2007). Оценка возможного изменения в ближайшем будущем режима, строения и ландшафта речных дельт становится актуальной научной и практической задачей, которая не может быть решена без разработки методов анализа, расчета и прогноза таких изменений. Комплекс таких методов пока не разработан.

В предлагаемой статье авторы попытались систематизировать имеющиеся физические подходы, которые могут стать основой при разработке упомянутых методов.

МИХАЙЛОВ Вадим Николаевич
доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши географического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова.

МИХАЙЛОВА Мария Вадимовна
кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем РАН.

Типы дельт и процесса дельтообразования

Начиная с Г. Креднера, дельты подразделяют на два основных типа: дельты выполнения (заполнения) и дельты выдвижения (выдвинутые). Первые из них формируются в устьевых водоемах эстуарного типа (ингрессионных заливах, губах, лиманах, лагунах, собственно приливных эстуариях) в процессе постепенного заполнения их речными наносами. Дельты второго типа образуются после выхода реки (рукава дельты) на открытое морское побережье. На эти дельты, в отличие от дельт первого типа, более сильное воздействие оказывают морские факторы (волнение, ветровые и приливные течения). Дельты выдвижения (выдвинутые дельты) типизируют по форме их нижнего (морского, озерного) края: по степени его выдвинутости и изрезанности. По этим признакам выделяют, например, дельты клювовидные, округлые, лопастные, типа птичьей лапки и др. (Щукин, 1974; Deltas – models…, 1975).

Процесс дельтообразования в устьях рек может быть двух типов: медленный (эволюционный) и быстрый (скачкообразный с прорывами). Процессы дельтообразования первого типа свойственны рекам с небольшим стоком наносов, второго типа – характерны для рек с большим стоком наносов (с мутностью воды более 0,8–1 кг/м^3). В дельтах таких рек наблюдаются повышенные уклоны водной поверхности и скорости течения, а берега самих рукавов имеют отметки более высокие, чем отметки поверхности прилегающих районов дельтовой равнины. Это и создает предпосылки для перелива вод через прируслевые валы или защитные дамбы в половодье и последующего прорыва рукава в новом направлении. После прорывов в прибрежной зоне моря на периферии старой дельты формируются так называемые причлененные частные дельты. В крупных дельтах после прорывов возникает сначала наложенная частная дельта на поверхности старой дельты, а позже – причлененная частная на открытом взморье. Ранее наиболее крупные прорывы были свойственны дельтам Амударьи, Хуанхэ, Или и Миссисипи (Михайлов, 1998).

У многих дельт процессы второго типа прекратились в результате либо значительного антропогенного уменьшения стока воды и наносов рек, либо проведения крупномасштабных защитных гидротехнических мероприятий в самих дельтах.

Гидравлическое сопряжение реки и приемного водоема в дельтах

Один из наиболее важных вопросов при исследовании взаимодействия речного потока и приемного водоема в пределах дельты – это оценка формы гидравлического сопряжения уровней воды в зоне этого взаимодействия.

Как показывают многочисленные исследования в неприливных устьях рек, в условиях установившегося движения воды, т.е. при отсутствии резких изменений расхода воды реки, а также приливов и сгонно-нагонных явлений, в любом пункте рукава дельты уровень воды H_i определяется сочетанием расхода воды реки Q_p и фонового уровня приемного водоема $H_м$:

$$\boldsymbol{H_i = f(Q_p, H_м).} \qquad (1)$$

Вдали от моря H_i зависит лишь от Q_p, т.е. связь H_i и Q_p представлена обычной кривой расходов $H_i = f(Q_p)$. На внешней (мористой) границе устьевого взморья H_i определяется в основном величиной $H_м$ ($H_i \approx H_м$). В промежуточных пунктах связи вида (1) могут быть представлены семейством кривых $H_i = f(Q_p)$, построенных при разных фиксированных величинах $H_м$.

В зоне сопряжения руслового потока и приемного водоема при разных величинах Q_p и $H_м$ могут формироваться кривые водной поверхности трех типов: кривые гидравлического подпора, когда в сторону приемного водоема глубина потока h увеличивается, а уклон водной поверхности I и средняя скорость течения V уменьшаются; кривые гидравлического спада, когда вдоль потока h уменьшается, а I и V увеличиваются; профиль, соответствующий квазиравномерному режиму, когда h, I и V вдоль потока остаются приблизительно неизменными.

При заданной величине $H_м$ существует единственный расход воды Q, при котором в зоне сопряжения руслового потока и приемного водоема устанавливается квазиравномерный режим. Этот расход (обозначим его Q_0) может быть рассчитан с помощью формулы Шези $V = \sqrt{hI}$, где V – средняя скорость потока, h – его средняя глубина, I – уклон водной поверхности, C – коэффициент Шези, равный по Ман-

нингу $C = h^{1/6}/n$, где n – коэффициент шероховатости. Заменяя V на Q/Bh , где B – средняя ширина русла, раскрывая коэффициент Шези через h и n и принимая, что при квазиравномерном режиме $I=i_0$, где i_0 – уклон дна в русле, получим

$$\boldsymbol{Q = Bh^{5/3} i_0^{1/2} n^{-1}.} \qquad (2)$$

Сравнивая фактический расход потока Q с Q_0, легко установить, что при $Q>Q_0$ формируется кривая спада, при $Q<Q_0$ – кривая подпора.

При заданной величине Q, но переменной величине $H_м$, существует единственное положение уровня воды в приемном водоеме, при котором на участке сопряжения будет наблюдаться квазиравномерный режим. Это произойдет, если в устьевом створе, т.е. в месте выхода русла в приемный водоем, глубина h_y (она определяется высотой $H_м$) будет равна так называемой нормальной глубине в русле (глубине квазиравномерного режима) вне зоны сопряжения. Такую глубину h_0 легко получить из формулы (2):

$$\boldsymbol{h_0 = \left[\frac{Qn}{B\sqrt{i_0}}\right]^{3/5}}. \qquad (3)$$

При $h_0>h_y$ в зоне сопряжения потока и приемного водоема будет формироваться кривая спада, при $h_0<h_y$ – кривая подпора.

Кривые вида (1) в любом пункте в зоне сопряжения руслового потока и приемного водоема становятся более пологими при повышении $H_м$, причем особенно сильно при малых величинах Q. При заданной величине $H_м$ кривые $H_i=f(Q_p)$ делаются тем положе, чем ближе пункт к приемному водоему.

Расчеты величины подпора при повышении уровня моря и дальности его распространения в реки или рукава дельт приобрели большую актуальность во время недавнего (1978–1995 гг.) значительного повышения уровня Каспийского моря. Проверка методов оценки подпорных явлений на примере устьев рек Каспийского региона может оказаться полезной при прогнозах возможного влияния на устья рек мира ожидаемого в XXI в. повышения уровня Мирового океана и связанных с ним морей.

Точные расчеты распространения подпора в рукава дельты могут быть сделаны лишь методами речной гидравлики. Применение таких методов (например, способа Н.Н. Павловского) при построении кривых подпора дает хорошие результаты в случае однорукавного русла, но в сложноразветвленных дельтах сталкивается с большими трудностями. Поэтому для приближенного расчета дальности распространения подпора $L_п$ (км) при повышении уровня моря на величину $\Delta H_м$ (м) допустимо использовать простую полуэпмирическую формулу $\boldsymbol{L_п = k\,\Delta H_м / I_0}$, (4)

где I_0 – уклон водной поверхности в русле до начала подъема уровня моря. Величине k=1 соответствует кривая подпора в виде горизонтальной линии, величине k=2 – кривая в виде части окружности.

Проверка формулы (4) на примере многих дельт (Михайлов, Михайлова, 2010) показала, что величина коэффициента k обычно изменяется в небольших пределах – от 1.8 до 2.2 (в среднем k=2.0).

Нагоны – одно из важнейших проявлений воздействия морских факторов (вместе с приливами) на режим устьев рек. В ряде случае крупные нагоны приводят к катастрофическим наводнениям и превращаются, таким образом, в опасные гидрологические явления.

Теоретически (Михайлов, 1998) может быть получена формула для расчета величины нагона на морском крае дельты (МКД)

$$\Delta \boldsymbol{H}_{нг} = \frac{\boldsymbol{k_W W^2 \cos\varphi L_W}}{\boldsymbol{g h_{взм}}}, \qquad (5)$$

где W – скорость ветра, φ – угол между направлением ветра и нормалью к берегу, $h_{взм}$ – глубина взморья, k_W – безразмерный коэффициент, равный $k_W = f_w\rho_w/\rho$, где f_w – коэффициент трения ветра о водную поверхность, равный по Экману и Манку в среднем $2{,}6\cdot10^{-3}$, $\rho_в$ – плотность воздуха, равная 1.2928 кг/м^3, ρ – плотность воды, зависящая от ее температуры и солености, L_W – длина разгона ветра.

Пропорциональность высоты нагона величине W^2 подтверждена на примере детальных исследований в устьях рек Урала и Дуная.

Начиная от МКД, нагонное повышение уровня воды распространяется (как и прилив) вверх по реке или рукаву дельты в виде свободной инерционной затухающей волны. Для расчета дальности распространения нагона вдоль русла $L_{нг}$ может быть использована формула, аналогичная (4), часто применяемая и при расчете дальнwости распространения в реку приливов.

Более оптимален другой способ расчета, разработанный в (Михайлов, 1998) и проверенный на примере устьев рек Дона и Дуная, позволяющий определять не только дальность распространения нагонов в реки и

рукава дельт, но и характер уменьшения вверх по течению величин нагонных повышений уровней воды.

Как показала обработка данных наблюдений, нагонная волна при движении вдоль русла распластывается тем быстрее, чем больше уклон водной поверхности в русле в период, предшествующий нагону, или расход воды реки (рукава). Величина нагона затухает согласно зависимости, близкой к экспоненциальной:

$$\Delta H_{нг,\,x} \,/\, \Delta H_{нг,\,\text{мкд}} = \exp(-mx), \quad (6)$$

где $\Delta H_{нг,\,x}$ – величина нагонного повышения уровня (м) на расстоянии x (км) от МКД, $\Delta H_{нг,\,\text{МКД}}$ – величина нагона у МКД, m – декремент затухания нагона, который зависит от расхода воды реки (рукава): $m=aQ+b$.

Распределение и перераспределение стока воды по водотокам дельты

Распределение и перераспределение стока воды и наносов по рукавам и его многолетние изменения – одна из важнейших гидрологических характеристик дельт и устьевых областей рек в целом.

Рассмотрим простейший случай двухрукавной русловой системы: два смежных рукава (1 и 2) имеют общий верхний узел разветвления и ниже по течению либо сливаются друг с другом, либо впадают в один и тот же приемный водоем. В этих случаях величины падения уровня в рукавах будут одинаковыми ($\Delta H_1=\Delta H_2$).

Применение уравнения квазиравномерного движения речного потока типа формулы Шези и вытекающей из нее формулы для расчета модуля гидравлического сопротивления $F = x\,Ln^2B^{-2}h^{-10/3}$ и уравнения баланса воды в рассматриваемой системе дает следующие расчетные формулы (Михайлов и др., 1986; Михайлов, 1998):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} = \frac{B_1}{B_2}\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{5/3}\left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{1/2}\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (7)$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_0, \quad (8)$$

где Q_1 и Q_2 – расходы воды в смежных рукавах, Q_0 – расход воды реки или подводящего рукава; F, B, h, n, L – соответственно модуль гидравлического сопротивления, ширина, средняя глубина, коэффициент шероховатости и длина каждого из рукавов.

Уравнения (7) и (8) позволяют объяснить причины существующего распределения расходов воды между рукавами 1 и 2, а также рассчитать, как перераспределятся расходы воды между этими рукавами, если произойдут естественные или антропогенные изменения величин B, h, n, L в обоих рукавах или в одном из них. Так, к увеличению доли стока рукава 1 приведут увеличение его ширины и глубины, уменьшение его длины и коэффициента шероховатости русла, а также изменения противоположного характера в смежном рукаве 2. Как следует из уравнения (7), наиболее сильно на перераспределение водного стока между рукавами влияют изменения глубины русел (в том числе вследствие повышения или понижения уровня моря).

При более сложной системе рукавов дельты гидравлический расчет распределения стока по рукавам возможен с помощью методов итераций или общих модулей сопротивления (Михайлов, 1998).

Как показывают расчеты, повышение уровня моря приводит к некоторому перераспределению стока в пользу небольших боковых водотоков и способствует рассредоточению стока воды по пространству дельты. Этот процесс противоположен тому, который сопутствует понижению уровня моря – сосредоточению стока в наиболее глубоких, обычно самых крупных рукавах дельты, и отмиранию более мелких боковых рукавов, что наблюдалось ранее в дельтах Волги и Урала.

Распределение расходов наносов R в узлах деления дельтовых рукавов обычно принимают пропорциональным распределению расходов воды: $R_1/R_2 \sim Q_1/Q_2$.

Гидролого-морфометрические характеристики водотоков дельт и тенденции русловых деформаций

К числу основных гидролого-морфометрических характеристик в отдельных створах или осредненных по участкам водотоков относятся: ширина русла B (м), средняя по сечению глубина русла h (м), площадь поперечного сечения ω (м^2), равная произведению Bh, расход воды Q (м^3/с), средняя по сечению скорость течения V (м/с), равная $Q/\omega=Q/Bh$, уклон водной поверхности I (‰ или доли единицы). Все перечисленные характеристики изменяются как во времени (в зависимости от колебаний Q и уровня воды H), так и в пространстве – вдоль любого водотока и от одного водотока к другому.

В каждом створе величины B, h, V связаны с изменяющимся Q степенными зависимостями вида $h = aQ^b$.

В системе разных водотоков их гидролого-морфометрические характеристики зависят от размера каж-

дого водотока, наиболее репрезентативным показателям которого служит его руслоформирующий расход $Q_ф$. В качестве такого расхода обычно принимают так называемый руслонаполняющий расход, при котором вода заполняет русло до бровки поймы, или расход воды в водотоке, соответствующий среднему максимальному расходу воды реки выше вершины дельты в период половодья.

Связи гидролого-морфометрических характеристик разных водотоков дельты с их руслоформирующими расходами воды получили название гидролого-морфометрических зависимостей. Для условий свободного (без влияния ограничивающих факторов) формирования русел водотоков в устьях рек на основе правила размерностей (π-теоремы) получены (Михайлов и др., 1986) безразмерные уравнения, связывающие между собой зависимые и независимые гидролого-морфометрические характеристики русел дельтовых водотоков. Формирующиеся в устьях рек русла обладают, как правило, тремя степенями свободы, т.е. свободно формируют свои поперечные (*B, h,*) и продольные (*I*) характеристики, являющиеся в данном случае зависимыми от комплекса характеристик независимых. Основные из них – руслоформирующий расход воды водотока $Q_ф$, соответствующая ему концентрация наносов в половодье $s_п$ и их плотность $\rho_н$, крупность влекомых наносов и донных отложений d, ускорение свободного падения g.

Теоретически упомянутые связи между зависимыми и независимыми характеристиками представляют собой комбинацию безразмерных комплексов, например, для ширины русла B и скорости течения V следующего вида:

$$\frac{B}{d} = c_1\left[\frac{Q^2}{gd^5}\right]^{x_B}\left[\frac{s_n}{\rho_н}\right]^{y_B} \qquad (9)$$

$$\frac{V}{\sqrt{gd}} = c_2\left[\frac{Q^2}{gd^5}\right]^{x_V}\left[\frac{s_n}{\rho_н}\right]^{y_V} \qquad (10)$$

Теоретически параметры с, х и у пока установить не удается. Но путем обработки обширного массива данных наблюдений в неприливных дельтах многих рек (в том числе, Каспийского региона) для систем рукавов при их руслоформирующих расходах воды $Q_ф$, соответствующих $Q_ф$ в вершине дельт, удалось получить приближенные осредненные эмпирические зависимости вида

$B_0 = K_B Q_ф^{1/2}$, (11) $h_0 = K_h Q_ф^{1/3}$, (12)

$V_0 = K_v Q_ф^{1/6}$, (13) $I_0 = K_I Q_ф^{-1/9}$. (14)

где коэффициенты K индивидуальны для каждой дельты, причем $K_B + K_h + K_V = 1$. В формулах (11) – (14) индекс 0 означает, что рассматриваемые характеристики *B, h, V* и *I* отвечают условию динамически устойчивого состояния русла.

Для рукавов дельт Каспийского региона для периода после зарегулирования стока рек, т.е. для второй половины XX в., получены, например, такие величины коэффициентов K в формулах (11) – (14) *(табл. 1).*

Дополнительный анализ, выполненный для дельт многих рек в пределах бывшего СССР (Михайлов, 1998), позволил выявить связь коэффициентов K с мутностью воды в период половодья $s_п$, что отвечает теоретическим зависимостям вида (9) и (10).

Имеющиеся данные показывают, что при прочих равных условиях в дельтах рек с повышенной концентрацией наносов формируются русла с меньшей площадью сечения, большей скоростью течения и бóльшим уклоном водной поверхности. Этим особенностям руслоформирования можно дать следующее объяснение: большое количество наносов, переносимых русловым потоком, требует большей скорости течения (и при неизменном расходе воды соответственно – меньшего поперечного размера русла). Повышенная скорость течения, согласно формуле Шези, может быть достигнута при увеличении уклона водной поверхности. Сказанное подтверждают данные табл. 1: для водотоков дельт Терека, Сулака и Куры с наибольшей мутностью воды величины K_B и K_h заметно меньше, а K_V и K_I больше, чем для водотоков дельт Волги и Урала с небольшой мутностью.

Формулы (11) – (14) при учете величин коэффициентов K для разных

Таблица 1. *Приближенные величины коэффициентов в зависимостях (11) – (14) для водотоков дельт Каспийского региона*

Дельта	K_B	K_h	K_V	$K_I, 10^{-5}$
Волги	7.0	0.57	0.25	5.3
Урала	6.0	0.61	0.27	8.1
Терека	4.3	0.47	0.50	40.0
Сулака	5.0	0.55	0.36	15.0
Куры	4.9	0.49	0.42	17.0

дельт (табл. 1) позволяют рассчитывать средние гидролого-морфометрические характеристики русел рукавов дельт, находящихся в динамически устойчивом состоянии.

Формулы вида (11) – (14) для конкретных дельт позволяют не только рассчитывать гидролого-морфометрические характеристики динамически устойчивых рукавов, но и определять тенденцию развития рукавов и оценивать интенсивность направленных (необратимых) русловых деформаций в них. Это можно сделать путем сравнения характеристик потока и русла B, h, V и I при руслоформирующем расходе воды, полученных путем измерений, с их устойчивыми величинами B_0, h_0, V_0 и I_0, рассчитанными с помощью приведенных выше формул. Критерии такой оценки приведены в *табл. 2*. При этом, чем больше разница между фактическими (измеренными) и рассчитанными (устойчивыми) характеристиками, тем больше будет интенсивность эрозионных или аккумулятивных процессов в дельтовых водотоках.

Соотношения, приведенные в табл. 2, проверены на примере многих неприливных дельт России и сопредельных стран (Волги, Терека, Куры, Кубани, Дуная и др. (Михайлов и др., 1986; Михайлов, 1998)). Подтверждено, что в процессе активизации и размыва рукава вне зависимости от причины этого процесса (увеличения в нем руслоформирующего расхода воды, искусственного сокращения длины, понижения уровня моря) в нем формируется относительно более узкое и глубокое русло. В рукавах, в которых преобладают процессы аккумуляции наносов, также вне зависимости от причин этого процесса формируются относительно более широкие и мелкие русла.

Таблица 2. *Критерии тенденции развития водотоков неприливных дельт*

Тенденция развития водотоков	Критерии
Активизация, размыв	$V>V_0$, $B<B_0$, $h>h_0$, $I>I_0$; $\frac{B}{h}<\frac{B_0}{h_0}$, $\frac{B^{2/3}}{h}<\frac{B_0^{2/3}}{h_0}$, $\frac{V^2}{h}>\frac{V_0^2}{h_0}$
Потеря активности, занесение и заиление, отмирание	$V<V_0$, $B>B_0$, $h<h_0$, $I<I_0$ $\frac{B}{h}>\frac{B_0}{h_0}$, $\frac{B^{2/3}}{h}>\frac{B_0^{2/3}}{h_0}$, $\frac{V^2}{h}<\frac{V_0^2}{h_0}$

Баланс наносов в дельте и процесс ее выдвижения или отступания

При исследовании процессов выдвижения дельты в приемный водоем или ее отступания можно применить метод баланса наносов в устье реки (Михайлов и др., 1986; Михайлов, 1998; Михайлова, 2006; Михайлов, Михайлова, 2010).

Уравнение баланса наносов в устье реки за интервал времени Δt можно представить в следующем виде:

$$W_р + W_м - W_{гл} - W_в = \Delta W_{кв}, \quad (15)$$

где $W_р$ – величина стока взвешенных и влекомых наносов реки в вершине дельты, $W_м$ – поступление морских наносов с вдольбереговым потоком из-за пределов устья, $W_{гл}$ – величина выноса мелких наносов течениями на большие морские глубины, $W_в$ – величина уноса крупных наносов с МКД и дна устьевого взморья за пределы устья под воздействием волнения, $\Delta W_{к.в}$ – изменение объема устьевого конуса выноса. Все члены уравнения (15) удобнее всего выразить в объемных единицах. Чтобы пересчитать составляющие баланса наносов из единиц массы в единицы объема (и наоборот) следует использовать таблицы плотности наносов и донных отложений в зависимости от их механического состава.

Применение уравнения (15) для количественных оценок развития дельт затруднено из-за недостатка надежных данных почти обо всех составляющих баланса наносов. Однако уравнение (15) позволяет исследовать процесс развития дельт качественно, причем с учетом таких факторов, как повышение или понижение уровня приемного водоема.

Для этого примем следующие допущения: 1) в формировании устьевого конуса выноса участвуют не все речные наносы, а лишь их часть, представленная в основном крупными наносами с диаметром частиц >0.05 мм. Их доля в полном стоке взвешенных и влекомых наносов составляет от 20 до 40%. Если за сток дельтоформирующих наносов принять величину $kW_р$, где k – упомянутая выше доля крупных наносов (k от 0.2 до 0.4), то в уравнении (15) можно не учитывать член $W_{гл}$; 2) величиной $W_м$ в большинстве случаев можно пренебречь, так как $W_м$ обычно значительно меньше $W_в$ (дельты не столько перехватывают вдольбереговой поток морских наносов, сколько служат источниками его пополнения вследствие абразии МКД).

С учетом этих двух допущений уравнение (15) в условиях относительно стабильного уровня моря упрощается:

$$kW_р - W_в = \Delta W_{кв}. \quad (16)$$

Для математической интерпретации изменения объема конуса выноса $\Delta W_{кв}$ предложено много геометрических моделей (их обзор дан в [Михайлов и др., 1986; Полонский и др., 1992]). Для качественной оценки процесса развития дельты можно воспользоваться простейшим выражением.

$$\Delta W_{кв} = \Delta L B_{МКД}, \quad (17)$$

где ΔL – средняя величина выдвижения дельты в море за интервал Δt, $B_{МКД}$ – длина МКД, принимаемая за ширину зоны отложения дельтоформирующих речных наносов на устьевом взморье, $h_{взм}$ – средняя глубина взморья.

Объединение формул (16) и (17) позволяет получить уравнение для расчета выдвижения или отступания дельты для трех случаев: относительно стабильного, понижающегося и повышающегося уровня моря (Михайлова, 2006; Михайлов, Михайлова, 2010).

Для условий относительно стабильного уровня моря имеем

$$\Delta L = (kW_р - W_В) / B_{МКД}. \quad (18)$$

Уравнение (18) показывает, что в рассматриваемых условиях интенсивность выдвижения дельты в море тем больше, чем больше сток дельтоформирующих наносов $kW_р$ и меньше глубина взморья $h_{взм}$.

Рассмотренные в статье физические основы гидрологических и морфологических процессов в речных дельтах и комплекс взаимосвязанных уравнений представляет собой гидролого-морфологическую модель изменяющейся дельты. Совместное использование приведенных выше уравнений позволяет объяснить и даже приближенно рассчитать и спрогнозировать изменения характеристик рукавов дельт под влиянием трех взаимосвязанных процессов: перераспределения стока между рукавами; изменения морфометрических характеристик рукавов (при размыве или заилении); увеличения или уменьшения длины рукавов при их выдвижении в море или отступании). Любое естественное или антропогенное изменение морфометрических характеристик русел рукавов влечет за собой гидравлически обусловленное перераспределение стока между рукавами, а оно, в свою очередь, ведет к изменению морфометрических характеристик русел.

Литература

1. ***Михайлов В.Н.***
Гидрология устьев рек. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 176 с.
2. ***Михайлов В.Н., Михайлова М.В.***
Дельты как индикаторы естественных и антропогенных изменений режима рек и морей // Водные ресурсы. 2003. Том 30. № 6. С. 655–666.
3. ***Михайлов В.Н., Михайлова М.В.***
Закономерности воздействия повышения уровня моря на гидрологический режим и морфологическое строение речных дельт // Водные ресурсы. 2010. Том 37. № 1. С. 3–16.
4. ***Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты.***
Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 280 с.
5. ***Михайлова М.В.***
Баланс наносов в устьях рек и формирование дельт при повышении и понижении уровня моря // Водные ресурсы. 2006. Том 33. № 5. С. 567–579.
6. ***Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А.***
Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 383 с.
7. ***Щукин И.С.***
Общая геоморфология. Том 3. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 382 с.
8. ***Climate Change 2007.***
Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
9. ***Deltas – models for exploration.***
Houston: Houston Geol. Soc., 1975. 555 p.

English

Physical principals of hydrological and morphological processes in river deltas.*

V.N. Mikhailov -
Doctor of Geographic Sciences, Professor,
Department of Hydrology, Faculty
of Geography, Moscow State University,
Moscow, 199991, Russia
e-mail: vn.mikhailov@mail.ru

M.V. Mikhailova -
Candidate of Geographic Sciences,
Senior Researcher, Water Problems Institute,
Russian Academy of Sciences,
3, Gubkina, Moscow, 119333, Russia
e-mail: mv.mikhailova@gmail.com.

Abstract

Physical principals of hydrological and morphological processes in river deltas are considered. Types of deltas and deltaformation processes are determined. Regularities of hydraulic connection between river and sea in deltas, influence of backwater and storm surges on deltaic regime, distribution of water flow among delta branches are described. Reasons and types of channel processes in deltas, regularities of sediment budget and delta progradation or retreat are considered.

Keywords: river, sea, delta, water runoff, backwater, storm surge, channel processes, delta progradation or retreat

References

1. ***Mikhailov V.N.***
Gidrologija ust'ev rek. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1998. 176 p.
2. ***Mikhailov V.N. , Mikhailova M.V.***
Del'ty kak indikatory estestvennyh i antropogennyh izmenenij rezhima rek i morej // Vodnye resursy. 2003. Tom 30. № 6. p. 655–666.
3. ***Mikhailov V.N. , Mikhailova M.V.***
Zakonomernosti vozdejstvija povyshenija urovnja morja na gidrologicheskij rezhim i morfologicheskoe stroenie rechnyh del't // Vodnye resursy. 2010. Tom 37. № 1.p. 3–16.
4. ***Mikhailov V.N., Rogov M.M., Chistjakov A.A. Rechnye del'ty.***
Gidrologo-morfologicheskie processy. L.: Gidrometeoizdat, 1986. 280 p.
5. ***Mikhailova M.V.***
Balans nanosov v ust'jah rek i formirovanie del't pri povyshenii i ponizhenii urovnja morja // Vodnye resursy. 2006. Tom 33. № 5. p. 567–579.
6. ***Polonskij V.F., Lupachev Ju.V., Skriptunov N.A.***
Gidrologo-morfologicheskie processy v ust'jah rek i metody ih rascheta (prognoza). SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. 383 p.
7. ***Shhukin I.S.***
Obshhaja geomorfologija. Tom 3. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1974. 382 p.
8. ***Climate Change 2007.***
Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
9. ***Deltas – models for exploration.***
Houston: Houston Geol. Soc., 1975. 555 p.

* *The work was financially supported by RFBR (projects №№ 11-05-00199, 13-05-00141).*

Изменения поверхностного и подземного стока рек России и их режимов в условиях нестационарного климата*

Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Телегина А.А.

Выполнена оценка и проведен анализ изменений характеристик годового, меженного и минимального месячного стока рек Европейской части России за 1978–2010 гг. в сопоставлении примерно с аналогичным периодом 1946–1977 гг. Установлены региональные закономерности гидролого-гидрогеологических процессов с выделением особенностей формирования стока рек бассейнов Волги, Дона, Урала и др. Проведена переоценка естественных ресурсов поверхностных и подземных вод за 1978–2010 гг. с построением соответствующих карт.

Ключевые слова: естественные водные ресурсы, поверхностные и подземные воды, подземный сток, речной сток, режим стока.

* *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-05-00467а, 13-05-00113а).*

Введение

В последнее время правомерность концепции стационарности многолетних колебаний гидрометеорологических характеристик вызывает сомнение в связи с усилившейся в конце XX и начале XXI вв. нестационарностью климатических процессов. Происходящие изменения климата уже привели в ряде крупных регионов к существенным изменениям водного режима.

Региональные тренды изменения температуры и осадков могут проявляться на фоне более длительных колебаний циклического характера с периодом несколько десятилетий, поэтому нельзя с уверенностью утверждать наличие тренда, а не определенной фазы циклических колебаний. Вместе с тем, анализ данных колебаний температуры воздуха и осадков за последние 25–35 лет свидетельствует, что этот период был не только самым теплым, но и самым влажным за время инструментальных наблюдений.

Цель данного исследования – изучение современных особенностей формирования и изменения ресурсов поверхностных и подземных вод. Объект исследования – бассейны средних рек, отражающих зональные закономерности формирования подземного и поверхностного стока. Масштаб исследования – крупные регионы и бассейны с различными природными и гидролого-гидрогеологическими условиями (отдельные водосборы и субъекты Европейской части России (ЕЧР)).

Влияние возможных климатических изменений на ресурсы пресных подземных вод проявляется в изменении так называемых естественных ресурсов, под которыми понимается именно та часть общих водных ресурсов, которая ежегодно возобновляется в процессе гидрологического цикла и обеспечивает, в частности, постоянный расход подземных вод зоны интенсивного водообмена за счет их питания атмосферными осадками, поверхностными водами и перетекания из смежных водоносных горизонтов.

Влияние долговременных климатических вариаций оценивается по изменению среднемноголетних и минимальных месячных величин естественных ресурсов подземных вод за 30-летний и более длительный период, который рассматривается как репрезентативный. При этом ме-

ДЖАМАЛОВ Роальд Гамидович доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией Института водных проблем РАН.

ФРОЛОВА Наталья Леонидовна доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова.

КИРЕЕВА Мария Борисовна кандидат географических наук, инженер кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова.

ТЕЛЕГИНА Анна Андреевна младший научный сотрудник Института водных проблем РАН.

тод оценки естественных ресурсов с помощью расчленения гидрографа реки получил широкое распространение в практике ввиду простоты, экономической эффективности и удобства надежных расчетов для любых площадей: административных, гидрогеологических районов и речных бассейнов.

В качестве основной характеристики естественных ресурсов подземных вод и подземной составляющей речного стока приняты среднемноголетние годовые величины подземного стока. В ряде случаев также используются: а) среднемноголетние значения подземного стока за периоды межени; б) средние величины подземного стока за периоды зимней и летней межени за конкретные годы; в) величины подземного и минимального месячного стока разной обеспеченности; г) годовые и сезонные величины подземного стока за конкретные годы. При региональных исследованиях величину естественных ресурсов подземных вод можно приравнять величине подземного стока, когда испарением с поверхности грунтовых вод можно пренебречь или оценить его значение отдельно. При этом допущении данные о подземном стоке широко используются для региональной характеристики естественных ресурсов подземных вод, особенно для территорий с гумидным или близким ему климатом.

В водном режиме рек России обычно выражены два маловодных сезона: летне-осенний и зимний (в районах с весенним половодьем), осенний и зимний (в районах с весенне-летним половодьем и паводками). При этом периоды небольших расходов воды менее 10 суток не рассматриваются в качестве меженных. С другой стороны, в меженный период могут быть включены паводки с объемом стока каждого из них до 10–15% объема стока за предшествующий или последующий меженный период [1]. Кроме того, в зимний и летне-осенний меженные периоды выделяется 30-дневный интервал времени с наименьшими значениями стока – период минимального стока, когда реки питаются лишь подземными водами. Продолжительность периода минимального стока как показателя ресурсов подземных вод зависит от устойчивости межени: зимой она определяется продолжительностью периода с отрицательными температурами воздуха, при которых прекращается поверхностный сток, а в летне-осенний сезон зависит от количества и интенсивности периодических осадков, способных вызвать высокие паводки. Характеристики меженного и особенно минимального стока имеют принципиальное значение для оценки лимитирующих значений водных ресурсов, когда реально возникает дефицит ресурсов для различных целей использования. Для северной половины ЕЧР лимитирующий сезон с возможным дефицитом водных ресурсов обычно связан с зимним периодом, когда величина стока рек составляет всего 10–50 % летне-осеннего стока. Для юга ЕЧР лимитирующий сезон обычно связан с летне-осенними месяцами, когда сток рек в 1, 5–2 раза меньше, чем за зимний период [1].

При выполнении данных исследований выбор периода осреднения меженных расходов для различных регионов ЕЧР проводился не только с учетом рассмотренных выше региональных обобщений, но прежде всего на основе генетического расчленения гидрографов рек по методике Б.И. Куделина [4]. В результате специальных исследований определены оптимальные периоды осреднения для расчета меженного (подземного) стока. Современные компьютерные технологии позволяют автоматизировать решение данной задачи. Все расчеты проводились для гидрологического года (1.XI–31.X). Пространственное распределение минимального стока характеризует в основном изменчивость 30-дневного минимального расхода воды 80%-ной обеспеченности для средних рек с площадями водосборов более 5000 км^2 [1].

С помощью статистических методов можно оценить закономерные изменения в характере многолетних колебаний элемента гидрологического цикла с определенной степенью достоверности. Наиболее надежная количественная оценка происшедших и ожидаемых изменений может быть получена в том случае, когда взаимодействие определяющих режим этого элемента ведущих природных и антропогенных факторов достаточно хорошо изучено.

Таким образом, количественное определение наблюдаемого или ожидаемого изменения гидрометеорологических характеристик (величин, параметров) требует оценки его неопределенности и установления причин изменения: разложение изменения на составляющие, связанные с действием разных факторов.

Водные ресурсы бассейна р. Оки

Проблема обеспечения водными ресурсами особенно остро стоит в населенных и промышленно развитых регионах центра ЕЧР, к которому относится бассейн р. Оки. В пределах бассейна частично или полностью расположены 14 субъектов РФ, ряд крупных городов и промышленных центров.

Речной сток в бассейне Оки практически не регулируется искусственными сооружениями и может считаться условно естественным. Исключение составляет лишь бассейн р. Москвы с 1213 действующими водохранилищами и прудами. Для пространственно-временного анализа и оценки изменения ресурсов подземных вод в данной работе использовались данные по 34 постам. Замыкающим створом, отражающим суммарный сток бассейна, служит пост г. Горбатов с площадью водосбора 244 тыс. км^2.

В бассейне Оки наблюдается общее увеличение водности за период инструментальных наблюдений. Так, колебания среднегодовых расходов воды Оки в г. Горбатов в 1930-х гг XX в. составляли 1000–1200, тогда как в 2000-х гг. – достигали уже 1300–1400 м^3/с. Среднее увеличение расходов воды за 1930–2010 гг. при аппроксимации многолетних колебаний линейным трендом составляет 40 м^3/с за 10 лет. Тенденция к увеличению подземной составляющей водных ресурсов проявляется в еще большей степени: около 2,2 км^3/10 лет за период1930–2010 гг. *(рис. 1)*.

На сглаженных графиках многолетних колебаний как общих водных ресурсов, так и подземной составляющей стока выявляется характер цикличности этих процессов при общей тенденции к их увеличению, т. е. прослеживается чередование фаз повышенной и пониженной водности. Продолжительность полного цикла колебаний составляет примерно 30 лет, что соответствует репрезентативной длине ряда гидролого-климатических характеристик. Аналогичный характер колебаний прослеживается для ресурсов подземных вод в наиболее критический лимитирующий месяц как в течение летне-осеннего (VI–X), так и зимнего (XI–III) периодов. Для оценки вклада поверхностной и подземной составляющей в суммарный речной сток широко используется коэффициент естественной зарегулированности стока (φ), представляющий собой отношение базисного стока к суммарному годовому стоку реки. Изменения коэффициента естественной зарегулированности в бассейне Оки ярко отражают увеличение роли базисного стока в суммарном годовом стоке. За период с 1930 по 2010 г. этот показатель возрос примерно в 1.5 раза. Связь коэффициента естественной зарегулированности стока с долей подземного стока в суммарном речном стоке носит очень тесный характер, коэффициент корреляции близок к единице.

Увеличение подземного питания рек подтверждается данными наблюдений на водно-балансовых станциях (ВБС), в том числе, и на Подмосковной ВБС, расположенной в Окском бассейне. По данным ГГИ, на большинстве водно-балансовых станций рост уровня грунтовых вод в среднем составляет 50–130 см [2]. При этом увеличение увлажненности происходит на фоне существенного потепления зимнего и весеннего сезонов, что приводит к снижению промерзания почвы, увеличению влажности зоны аэрации и соответствующему повышению

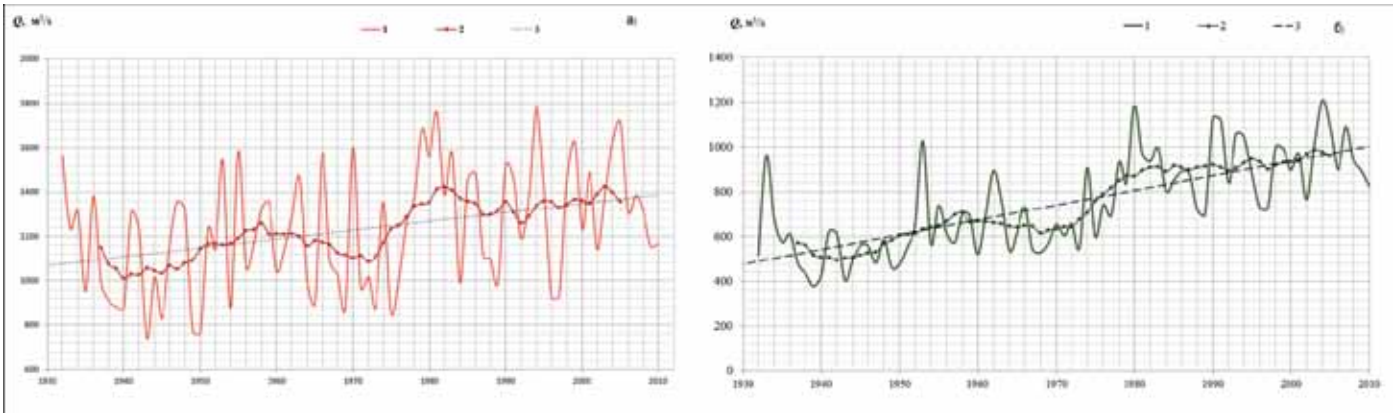


Рис. 1. *Многолетние колебания общих водных ресурсов (а) и ресурсов подземных вод (б) в бассейне Оки (р. Ока – г. Горбатов): 1 – средний годовой и меженный расход воды; 2 – сглаженные колебания среднего годового и меженного расходов воды при 11-летнем осреднении; 3 – линейный тренд среднего годового и меженного расходов воды*

абсолютной и удельной величин питания подземных вод и их естественных ресурсов.

Для получения расчетных характеристик стока с учетом влияния современных вариаций климата используется относительно простой подход к выбору расчетного периода, основанный на построении разностных интегральных кривых стоковых характеристик. Подобный анализ многолетних колебаний стока в бассейне Оки позволил определить переломный год с устойчивым увеличением расходов воды с 1978 г. Это особенно характерно для постов, расположенных в среднем и нижнем течении самой Оки и в замыкающих створах наиболее крупных ее притоков, где подобный рост стока статистически достоверен. Если для общего речного и подземного стока в качестве переломного года можно выделить 1976–1977 гг., то минимальный месячный летний сток начинает возрастать уже с 1975 г., а коэффициент естественной зарегулированности стока – с 1970 г.

Суммарные водные ресурсы закономерно снижаются с северо-запада на юго-восток. В верхнем течении Оки (до г. Калуга) они составляют 6–7 л/(с•км^2), Наибольшие значения (7–9 л/(с•км^2)) наблюдаются в северной и северо-западной частях региона – в бассейнах рр. Москвы, Нерли, Клязьмы. Правобережные притоки нижнего течения Оки отличаются наиболее низкими значениями модуля водных ресурсов – 4–5, снижаясь в бассейне Цны до 3–4 л/(с•км^2). Изменения общих водных ресурсов в бассейне колеблются в пределах 20–30 %, причем имеют как положительный, так и отрицательный знак *(рис. 2)*.

Совершенно иная картина наблюдается в многолетних колебаниях ресурсов подземных вод, характеризуемых средними меженными расходами воды. Наиболее интенсивный рост естественных ресурсов подземных вод (в 2 раза и более) наблюдается на правобережье нижнего течения Оки, в бассейнах рек Мокша и Цна.

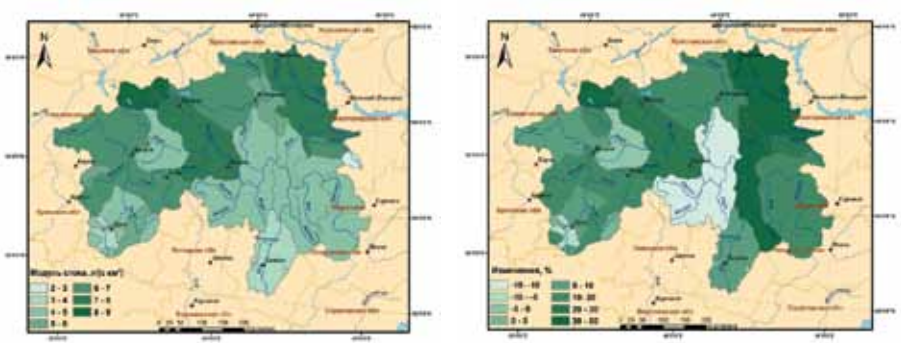


Рис. 2. *Суммарные водные ресурсы бассейна Оки (осредненные за период 1978–2010 гг., слева) и их изменение (%) по отношению к периоду 1946–1977 гг.*

Распределение ресурсов подземных вод в Окском бассейне носит неравномерный характер. Однако колебания ресурсов подземных вод по площади водосбора носят синхронный характер, что говорит о том, что даже на малых реках, сток которых часто отражает исключительно индивидуальные условия каждого водосбора, сказалось общее увеличение увлажненности, приводящее к увеличению ресурсов подземных вод. Наиболее высокие значения водных ресурсов (6–8 л/(с•км^2)) свойственны бассейну р. Москва, низовьям Оки (от г. Касимов до г. Горбатов) и нижнему течению р. Клязьма. Наименьшими ресурсами подземных вод обладает юго-восточная часть бассейна, но на участке с минимальными модулями подземного стока наблюдается их наибольшее увеличение, до 100 % *(рис. 3)*. Современный рост ресурсов подземных вод происходит как во время летней, так и зимней межени. Область наибольших изменений этих характеристик также как и для ресурсов подземных вод в целом локализуется в юго-восточной части бассейна, где прирост минимальных месячных модулей стока достигает 100 %.

Исключительно важным представляется значение ресурсов подземных вод в наиболее критический, лимитирующий месяц. Для 80 % рек наименьшие месячные значения стока наблюдаются в летний период. Однако более целесообразно рассматривать зимний и летний периоды в отдельности. Наиболее высокие

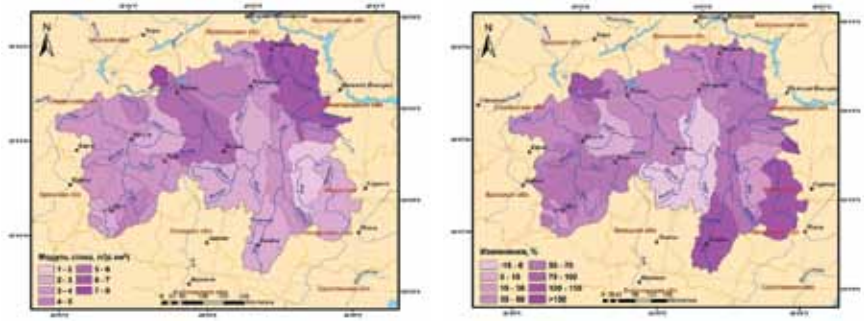


Рис. 3. *Современные естественные ресурсы подземных вод бассейна Оки (осредненные за период 1978–2010 гг., слева) и их изменение (%) по отношению к периоду 1946–1977 гг. (справа)*

значения модуля подземного стока 5–7 л/(с•км^2) наблюдаются в среднем и нижнем течении Оки, а также на притоках северной части водосбора. Область наименьших значений локализуется в юго-восточной части водосбора, где в критические месяцы модуль подземного стока снижается до 2 л/(с•км^2) и менее. Изменчивость минимальных месячных значений ресурсов подземных вод имеет пространственное распределение, аналогичное ресурсам подземных вод в целом. Синхронность изменения зимних и летне-осенних ресурсов подземных вод может быть также показана с помощью графиков связи этих двух величин. Зависимости такого рода представляют собой линейные уравнения, с коэффициентами корреляции до 0,8.

Доля подземного стока в суммарном стоке бассейна Оки меняется от 0,3 до 0,7, составляя в среднем около 0,5–0,6. Изменение этого соотношения наглядно иллюстрирует все возрастающую роль естественных ресурсов подземного стока в суммарных водных ресурсах региона. Соотношение подземной и поверхностной составляющей стока, традиционно считавшееся <1 для рек ЕЧР, возрастает практически в 3 раза за период инструментальных наблюдений.

Согласно выполненным расчетам современные суммарные водные ресурсы в бассейне Оки составляют 43,1 км^3/год и возросли за 1976–2010 гг. в среднем на 18 %. При этом 29,4 км^3/год (около 70 %) составляют ресурсы подземных вод *(табл. 1)*.

Проведенный статистический анализ выявил существование неоднородности в многолетних колебаниях стока по всем исследуемым характеристикам (критерий Стьюдента), а также снижение изменчивости минимального месячного зимнего и летнего стока.

Водные ресурсы бассейна р. Дон

Бассейн р. Дон – второй по площади бассейн на Европейской части территории Российской Федерации (422000 км^2). Однако по общему объему водных ресурсов он занимает лишь пятое место в ЕЧР, уступая Волге, Печоре, Северной Двине и Неве. Объем речного стока в бассейне Дона оценивается в 26,8 км^3/год, модуль среднегодового стока составляет около 2 л/(с·км^2).

В качестве основного метода оценки водных ресурсов поверхностных и подземных вод служит эмпирико-статистическая обработка рядов годового и меженного стока, полученных путем измерения расходов и уровней воды на гидрологических станциях и постах. В бассейне Дона по состоянию на 2010 г. функционирует 84 гидрологических поста с наблюдениями за стоком воды, т.е. около 80% гидрометрической сети относительно периода ее максимального развития к настоящему времени утрачено. В связи с массовым сокращением гидрометрической сети, в настоящее время все более актуальными становятся расчетные методики оценки и прогноза ресурсов поверхностных и подземных вод.

По аналогии с бассейном Оки для выделения репрезентативного периода современных изменений стока и водных ресурсов использовалась методика построения разностных интегральных кривых стока рек бассейна Дона, по которым для каждой изучаемой характеристики выделялся переломный год. Цикличность многолетних колебаний общих водных ресурсов в бассейне Дона прослеживается довольно слабо. В качестве расчетного периода для получения современных оценок водных ресурсов бассейна Дона выбран период 1978–2010 гг., что упрощает сравнение с соседними водосборами (Оки, Волги), а также охватывает два полных последних цикла колебаний водности. Именно для этого расчетного периода построены ниже приведенные карты водных ресурсов рек и их изменений.

В целом общие водные ресурсы за 1978–2010 гг. в бассейне Дона изменяются от 5,3 л/(с·км^2) (верхнее течение Дона – р. Красивая Меча) до 0,6 л/(с·км^2) для левобережных притоков Цимлянского водохранилища и низовьев Дона. Относительно пониженными модулями стока обладает восточная часть Донского бассейна: бассейны Медведицы, Бузулука и Иловли. Здесь даже в самом верхнем течении модули среднегодового стока не превышают 2–2,5 л/(с·км^2), составляя в среднем 1–1,5 л/(с·км^2). Область наименьших значений водных ресурсов для всего бассейна Дона локализуется вокруг Цимлянского водохранилища, здесь из-за большого влияния ирригационных систем и повышенного испарения, модули среднегодового стока не пре-

Таблица 1. Водные ресурсы (W) в бассейне Оки и их изменение (C_v) за 1946–2010 гг. (р. Ока – г. Горбатов)

Период	Показатель	W км³/год	$W_{подз}$ км³/год	$W_{мин.}$ месячный, км³/год		φ
				зима	лето-осень	
1946-1977	Среднее	36,5	20,2	14,5	16,6	0,62
	C_v	0,22	0,21	0,24	0,23	0,12
1978-2010	Среднее	43,1	29,4	24,3	23,8	0,74
	C_v	0,18	0,15	0,21	0,18	0,09
Изменение, %		18	46	67	43	18
F-критерий Фишера		0,97	1,10	2,20	1,29	0,70
t-критерий Стьюдента		-3,54	-9,02	-9,30	-7,46	-6,79

вышают 0,5–1 л/(с·км²) *(рис. 4)*. Объем водных ресурсов (среднегодового стока) р. Дон за период наблюдений в последние годы постепенно снижается. Так, по оценкам 1987 г. общие водные ресурсы бассейна составляли 28,1, по оценкам до 2005 г. – 26,8, по выполненным расчетам объем стока в створе ст. Раздорская по оценкам на 2010 г. составляет 22,1 км³ в год. Изменения общих водных ресурсов в Донском бассейне носят слабовыраженный характер: сток сокращается к нижнему течению Дона (рис. 4). Для определения значимости и достоверности направленных изменений многолетних колебаний стока использовались различные статистические критерии.

Оценка величины среднего меженного расхода становится актуальной для переоценки ресурсов подземных вод на современном этапе. За средний меженный сток в Донском бассейне приняты осредненные расходы воды за XII-II и VII-IX месяцы. Исключительно важным представляется также значение минимального месячного стока за зимнюю (XI-II) и летне-осеннюю (VII-X) межень, отражающее значение ресурсов подземных вод в наиболее критические лимитирующие месяцы.

Ресурсы подземных вод в бассейне Дона невелики, что связано с его географическим положением в зоне недостаточного увлажнения. В среднем для бассейна модуль ресурсов подземных вод за 1978–2010 гг. (р. Дон – ст. Раздорская) составляют 1,6 л/(с·км²), тогда как для бассейнов Верхней Волги, Камы данная величина равняется 4–6 л/(с·км²) [3]. В среднем течении реки (р. Дон – ст. Казанская) в естественных условиях формирования стока средний модуль подземных вод составляет уже 2 л/(с·км²). Закономерное уменьшение среднего меженного модуля стока происходит с северо-запада на юго-восток от 2–3 (г. Задонск) до менее 1 л/(с·км²) для всего нижнего течения Дона (рис. 5). Сравнение пространственного распределения полученных значений меженного стока, характеризующего естественные ресурсы подземных вод, с их распределением по оценкам 1960–1970-х годов показывает, что при общей схожести конфигураций изолиний модуля практически повсеместно наблюдается их сдвиг в юго-восточном направлении, отражающий увеличение меженного стока в 1,5–2 раза. Увеличение среднего меженного модуля стока происходит как за счет зимней, так и за счет летней межени.

Наиболее сильные изменения меженного стока, где ресурсы подземных вод возросли на 60–100 %, сосредотачиваются в верховьях Дона, Северского Донца, Хопра и Медведицы. Слабое сокращение ресурсов подземных вод наблюдается в наиболее засушливой области вокруг Цимлянского водохранилища *(рис. 5)*.

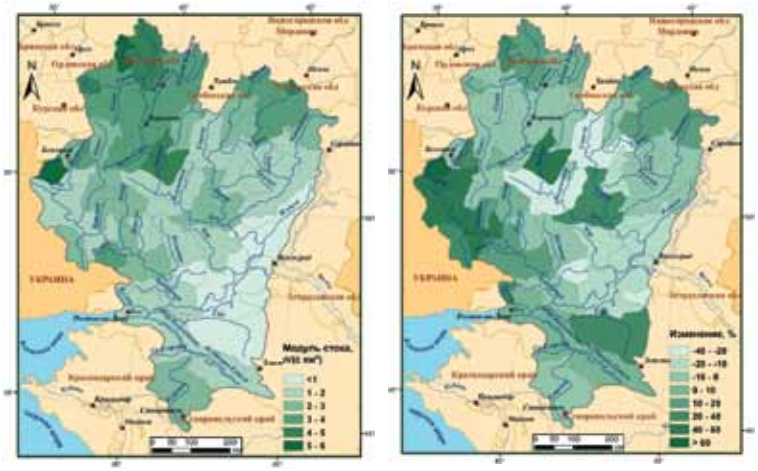


Рис. 4. *Суммарные водные ресурсы бассейна Дона (осредненные за 1978–2010 гг., слева) и их изменение (%) по отношению к периоду 1946–1977 гг. (справа)*

За последние сорок лет в бассейне Дона произошло беспрецедентное увеличение ресурсов подземных вод. Увеличение данной характеристики для некоторых створов произошло в два и более раз. Если в начале 1960-х годов модуль подземного стока изменялся от 2,5 до 0,3 л/(с·км^2), составляя в среднем 0,8 л/(с·км^2) для бассейна, то в настоящее время он может быть охарактеризован диапазоном значений от 4 до 0,3 л/(с·км^2), а среднее значений для бассейна увеличилось до 1,5 л/(с·км^2). Доля подземного питания в суммарном речном стоке для современного периода для частных водосборов составляет в среднем для бассейна 0,4–0,5, а для замыкающих створов в результате кумулятивного эффекта она увеличивается до 0,6–0,7. Наибольшее увеличение доли подземного питания происходит в северной части Донского бассейна (верховья Дона, рр. Воронеж, Битюг, Савала, Ворона, Верховья Хопра и Медведицы). Подобные изменения сказались на коэффициенте естественной зарегулированности стока, который в настоящий момент возрос в 1,5–2 раза, достигнув значения 0,7–0,8 для большинства рек Донского бассейна.

Пространственное распределение ресурсов подземных вод за наиболее критический месяц зимней и летне-осенней межени носит сходный характер, уменьшаясь с северо–запада на юго–восток. Наиболее высокие минимальные зимние и летние модули стока воды наблюдаются в бассейне верхнего Дона, Красивой Мечи и составляют около 3 л/(с·км^2). При этом летние расходы в 84 % случаев (43 из 51 створа) оказываются меньше зимних. На фоне общего увеличения водности межени изменения минимальных месячных расходов воды носят наиболее явный характер. Статистически достоверные изменения характеристик минимального месячного стока как за зимний, так и за летний период фиксируются для всех изученных створов.

Область наибольших изменений минимальных месячных расходов проявляется в достаточно широкой полосе, протянувшейся в средней части бассейна Дона с юго-запада на северо-восток. Увеличение минимальных месячных модулей стока за 1978–2010 гг. по отношению к среднему за 1946–1977 гг. для большей части бассейна составляет 30–60 %. В верхнем течении Дона (выше г/п Лиски) изменение модулей в зимний период составляет 50–100, в летне-осенний – 40–60 %. Существенное увеличение минимальных месячных расходов воды происходит с конца 1970-х гг.).

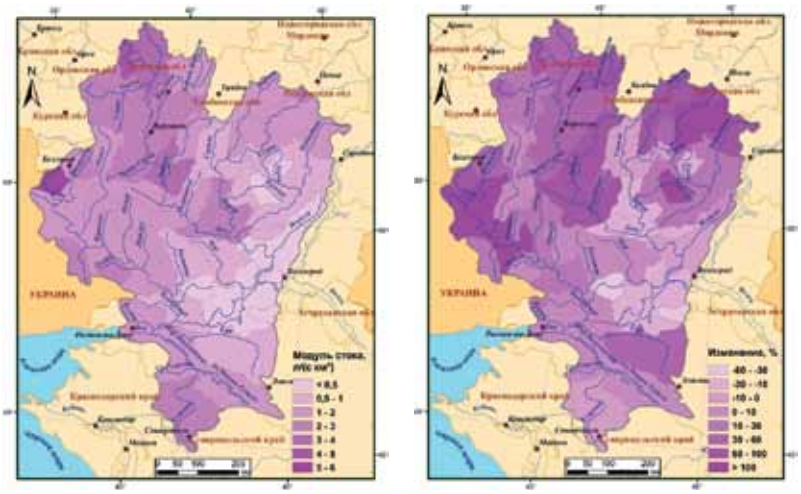


Рис. 5. *Современные естественные ресурсы подземных вод бассейна Дона (осредненные за 1978–2010 гг., слева) и их изменение (%) по отношению к периоду 1946–1977 гг. (справа)*

Анализ пространственно-временной изменчивости ресурсов подземных вод за лимитирующие месяцы для рек бассейна Дона показывает, что в последние 40 лет наблюдается интенсивное, статистически достоверное и не имеющее аналогов в предыдущие годы увеличение ресурсов подземных вод за лимитирующие месяцы, характерное как для зимнего, так и для летне-осеннего периода.

Водные ресурсы бассейна р. Урал

Трансграничная р. Урал (площадь водосбора 236 тыс. км^2, длина 2428 км) протекает по территории России и Казахстана. Главная особенность гидрологического режима рек бассейна Урала – чрезвычайная неравномерность стока. Режим стока большинства рек уральского бассейна характеризуется высоким весенним половодьем и низкой летней меженью с редкими дождевыми паводками. Основное формирование стока рек Урала происходит в верхней горной части бассейна, где выпадает большое количество осадков, в то время как в южной части бассейна (Прикаспийской низменности) происходят потери стока на испарение и просачивание в рыхлые отложения (до 20%).

В настоящее время в бассейне Урала действует более 40 гидрологических постов, расположенных на территории Оренбургской, Челябинской областей и Башкортостана. В 1920-1930 гг. все реки бассейна имели повышенную водность. Затем до начала 1940-х гг. сток рек был понижен (в отдельных случаях

в 2–3 раза по сравнению с нормой). С 1950 г. и до середины 1980-х гг. в бассейне Урала наблюдался в основном пониженный сток рек. С начала 1990-х гг. сток рек в среднем возрастал. Для всех рек территории различия в величине стока за многоводные и маловодные годы достаточно существенны. На основании анализа разностных интегральных кривых в качестве границы между двумя анализируемыми периодами стоковых характеристик выбран 1983 г.

Оценка изменения годового стока за период 1984-2008 гг. по сравнению с предшествующим периодом 1946-1983 гг. показывает, что для большинства рек наблюдается увеличение годового стока, в половине случаев статистически значимое *(рис. 6)*. Исключение составляют верховья Урала (г. Верхнеуральск), р. Орь (с. Истемес), р. Илек – Веселый, нижнее течение р. Урал, где уменьшение нормы годового стока продолжается и в настоящее время. Распределение модуля общих водных ресурсов (годового стока) характеризуется общим убыванием с севера на юг в связи с изменениями климатических факторов (температуры воздуха, осадков). Модули годового стока по длине р. Урал изменяются от 2,8 л/(с·км^2) до 1,2 у г. Оренбург и 1,.7 л/(с·км^2) в створе с. Кушум. До замыкающего створа р. Урал (г. Гурьев) доходит лишь 75% стока, наблюдающегося в с. Кушум. Общие естественные ресурсы (годовой сток), поступающие на территорию Западно-Казахстанской области из Оренбургской области РФ по руслу р. Урал, составляют 9,3 км^3/год. Из этого количества 1.4 приходится на сток, формирующийся в Казахстане, остальные 7,9 км^3/год формируются в РФ.

В качестве характеристики подземной составляющей речного стока принят меженный сток, рассчитываемый как среднемесячные расходы воды за маловодные месяцы: средние расходы за период летне-осенней (VII-X) и зимней межени (XI-II). В качестве переломного (порогового) года для расчета современных характеристик меженного и минимального месячного стока выбран также как и для годового 1983 г. При этом для всех расчетных водосборов построены и проанализированы графики многолетних колебаний меженного и минимального месячного стока за зимнюю и летне-осеннюю межень. В последние десятилетия наблюдается существенный и статистически значимый рост меженного стока. Минимальные годовые расходы воды на реках в бассейне Урала обычно формируются в период с ноября по апрель. По длине реки Урал время формирования годового минимума расходов воды постепенно смещается с февраля-марта (верховья Урала) на декабрь (ниже г. Оренбург).

Минимальные месячные величины летне-осеннего стока в верховьях р. Урал наблюдаются в августе-сентябре, в средней части – в октябре; зимние минимумы, как правило, отмечаются в феврале-марте. Если раньше средние значения минимального зимнего стока были в 2-3 раза ниже, чем летне-осеннего, то в последние годы наблюдается обратная тенденция. Изменения

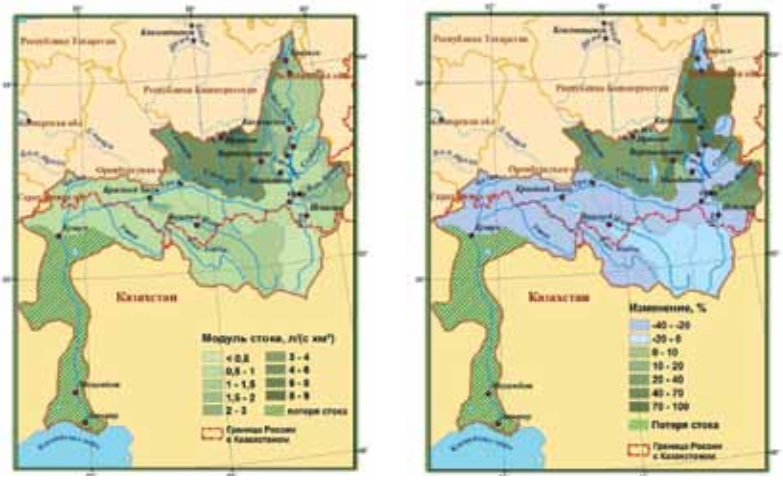


Рис. 6. *Суммарные водные ресурсы бассейна Урала (осредненные за 1984–2008 гг.– слева) и их изменение (%) по отношению к периоду 1946–1983 гг. (справа)*

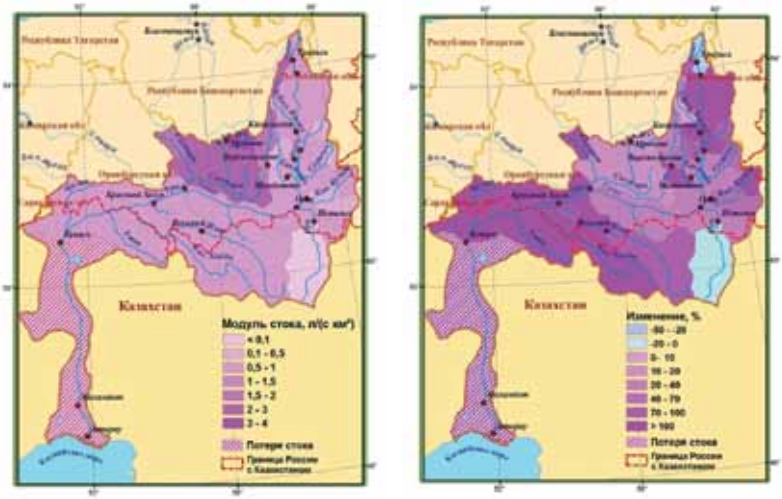


Рис. 7. *Современные естественные ресурсы подземных вод бассейна Урала (осредненные за 1984–2008 гг.– слева) и их изменение (%) по отношению к периоду 1946–1983 гг. (справа)*

минимального стока на большей части рек бассейна происходят синхронно.

Распределение минимального месячного зимнего стока и его изменение в последние десятилетия показывают, что в отличие от годового, меженного и минимального летне-осеннего его показатели увеличились на всех исследуемых реках. Причем это увеличение составляет до 100 % и более, что объясняется, прежде всего, климатическими факторами. Изменчивость минимального стока в многоводные и маловодные годы очень высока: в летне-осенний период 3-30 раз, зимой– 6-10 раз. Значительное количество малых рек, площадь водосбора которых до 200 км^2, летом пересыхают, зимой промерзают.

Изменения коэффициента естественной зарегулированности стока в бассейне Урала отражает увеличение роли базисного стока в суммарном годовом. За период с 1946-1983 гг. по 1984-2010 гг. этот показатель в среднем для рек бассейна увеличился примерно на 20 %. Коэффициент естественной зарегулированности стока увеличивается с уменьшением доли стока за половодье и увеличением подземного стока. Данная тенденция характерна для абсолютного большинства рек бассейнов Дона, Волги и Урала.

Благодаря увеличению подземной составляющей стока изменилось соотношение между поверхностной и подземной генетическими составляющими. Иными словами, именно ресурсы подземных вод в современных условиях их формирования могут служить наиболее надежным источником водообеспеченности субъектов РФ.

Литература

1. ***Владимиров А.Н.***
Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 364 с.
2. ***Водные ресурсы России и их использование.***
Под ред. И.А. Шикломанова. ГГИ, С.-Петербург, 2008. 598 с.
3. ***Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Сафронова Т.И.***
Динамика подземного стока бассейна Дона под влиянием изменений климата // Недропользование - XXI век. 2010. № 4. с. 78–81.
4. ***Куделин Б.И.***
Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд. МГУ, 1960. 344 с.

English

Variations in Surface and Subsurface Runoff and the Regimes of Russian Rivers under Unsteady Climate *

Roald G. Dzhamalov –
Dr. Sc., Head of Laboratory of the Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences,
3, ul. Gubkina, Moscow, 119333, Russia
e-mail: dzhamal@aqua.laser.ru

Maria B. Kireeva –
Ph.D., Department of Land Hydrology, Moscow State University, Leninskie Gory,
GSP-1, Moscow, 119991, Russia
e-mail: kireeva_mb@mail.ru

Natalia L. Frolova –
Dr. Sc., Professor, Department of Land Hydrology, Moscow State University, Leninskie Gory,
GSP-1, Moscow, 119991, Russia
e-mail: rolova_nl@mail.ru

Anna A. Telegina –
junior researcher of the Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences,
3, ul. Gubkina, Moscow, 119333, Russia
e-mail: annatelegina29@yandex.ru

Abstract

Variations in the characteristics of the annual, dry season, and minimal monthly runoff in rivers of European Russia for 1978–2010 have been estimated and analyzed in comparison with a period of the same duration 1946–1977. Regional regularities in the hydrological and geohydrological processes have been identified, with identification of specific features in the formation of river runoff in the basins of the Volga, Don, Ural, etc. The natural resources of surface and subsurface waters over 1978–2010 have been reestimated with the construction of appropriate maps.

Keywords: natural water resources, surface water and groundwater, groundwater flow, river runoff, runoff regime

References

1. ***Vladimirov A.N.***
Gidrologicheskie raschety [Hydrological calculations]. Gidrometeoizdat, Leningrad. 1990. 364 p.
2. ***Vodnye resursy Rossii i ih ispol'zovanie.***
Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanov I. A. (ed.) St Petersburg. State Hydrological Institute. 598 p.
3. ***Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Safronova T.I.***
Dinamika podzemnogo stoka bassejna Dona pod vliyaniem izmeneniya klimata [Climate-Induced Changes in Groundwater Runoff in Don Basin] //Subsurface use – XXI. 2010. 4. p. 78-81.
4. ***Kudelin B.I.***
Principy regional'noj ocenki estestvennykh resursov podzemnykh vod [Principles of Regional Assessment of Natural Resources of Underground Waters]. Moscow State University, 1960. 344 p.

* *The work was financially supported by RFBR (project № 11-05-00467a, 13-05-00113a).*

Влияние изменений климата на экосистемы озер*

Филатов Н.Н., Руховец Л.А. , Назарова Л.Е., Баклагин В.А., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Толстиков А.В., Шаров А.Н.

Изучены особенности воздействия изменений климата на экосистемы озер, расположенных в условиях как достаточно сильного антропогенного воздействия на примере озер Севера Европейской территории России (ЕТР), так и слабого его влияния на примере озер Восточной Антарктиды (ВА).

Ключевые слова: озера, климат, биота, экосистемы, измерения, моделирование.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-05-00963).*

Материалы и методы исследований

Использованы гидрометеорологические данные наблюдений на метеорологических станциях (МС) Росгидромета за последние 100 лет, а также сведения о гидрологическом и химико-биологическом режимах более чем по 60 озер Севера ЕТР, при этом для анализа использовались данные имеющих наибольшую длительность наблюдений, порядка 60 лет, (Ефремова, Пальшин, 2011). Анализировались сведения, полученные по 27 озерам Восточной Антарктиды во время проведения 56-й Российской Антарктической экспедиции (Филатов и др., 2012) *(рис. 1)*.

Выполнен вероятностный анализ данных длительных рядов гидрометеорологических наблюдений, элементов водного баланса, гидрологических и химико-биологических параметров озер для изучения их изменчивости во временных масштабах от десятков лет до внутригодовых колебаний.

ФИЛАТОВ
Николай Николаевич
член-корреспондент РАН, директор Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

РУХОВЕЦ
Леонид Айзикович
профессор, доктор физико-математических наук, директор Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН.

БАКЛАГИН
Вячеслав Николаевич
кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

ГЕОРГИЕВ
Андрей Павлович
кандидат биологических наук, научный сотрудник Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

ЕФРЕМОВА
Татьяна Владимировна
кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

ПАЛЬШИН
Николай Иннокентьевич
кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

ТОЛСТИКОВ
Алексей Владимирович
кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

НАЗАРОВА
Лариса Евгеньевна
кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

ШАРОВ
Андрей Николаевич
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

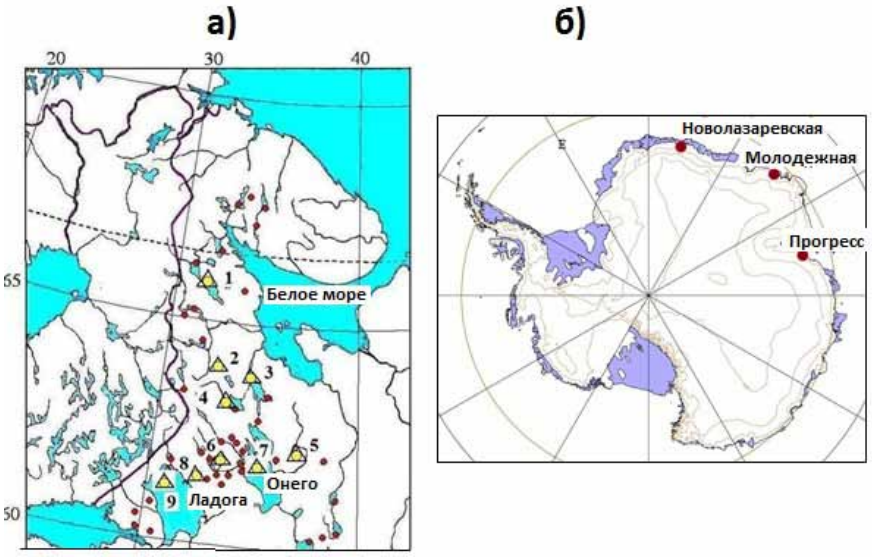


Рис. 1. *Схема расположения исследованных озер: а) Озера Севера ЕТР – точками. Треугольник с кружком – показаны озера, для которых имеются наиболее длительные наблюдения вплоть до 2011 г. 1 – Топозеро, 2 – Ругозеро, 3 – Выгозеро, 4 – Сегозеро, 5 – Водлозеро, 6 – Сямозеро, 7 – Онежское, 8 – Тулмозеро, 9 – Ладожское. б) районы исследования озер в Антарктиде*

Для оценки реакции Ладожского и Онежского озер, кроме данных измерений, использовались разработанные коллективом авторов СПб ЭМИ РАН (Астраханцев и др., 2003; Ladoga and Onego, 2010) трехмерные математические модели, в основе которых лежат методы геофизической гидродинамики, численные методы решения уравнений в частных производных, методы анализа водных экологических систем.

Изменения климата Севера Европейской территории России по данным инструментальных измерений

По данным анализа гидрометеорологических наблюдений на Севере ЕТР в течение XX в. и первого десятилетия XXI в. отмечается положительная тенденция изменения средней годовой температуры воздуха. Начиная с 1988 г., значения средней годовой температуры воздуха превышали климатическую норму, рассчитанную за 1961–1990 гг., практически во все годы (Филатов и др., 2012). Интенсивность повышения температуры воздуха (ТВ) на Севере ЕТР постепенно возрастает по мере продвижения от высоких широт к более низким. Коэффициенты линейных трендов за период 1951–2011 гг. составляют 0,20–0,34^{0}С/10 лет для территории Карелии, около 0,30^{0}С/10 лет на территории Кольского полуострова. Выявлены квазициклические колебания метеопараметров с различными временными масштабами (около 60, 30, 11, 5 и 2 лет).

Результаты анализа данных показывают, что во внутригодовом ходе изменение средних месячных значений температуры воздуха происходит неравномерно для разных сезонов года и неоднородно для исследуемого региона. Общим является то, что наиболее интенсивное потепление отмечается в марте (+0,45 …+0,6^{0}С/10 лет) на всех станциях исследуемой территории. В течение 1951–2011 гг. наблюдается рост годовых сумм осадков. Заметно уменьшаются годовые суммы осадков вблизи крупных водоемов.

Влияние изменения климата на гидрологический режим озер

Уровень воды

Особый интерес вызывают процессы в экосистемах крупнейших озер Европы, и в частности, колебания уровня воды, элементов водного баланса, которые отражают происходящие климатические изменения. В колебаниях уровня воды Ладожского и Онежского озер по данным с 1881 г. по 2011 г. нет заметного тренда, отмечаются квазипериодические колебания, маловодные и многоводные годы. По спектрам колебаний уровня озер можно выделить составляющие с временными масштабами порядка 60, 30 и 6–7 лет.

Температура воды

По данным измерений за 60 лет в последние 20 лет отмечается повышение средней годовой температура поверхности воды (ТПВ) Великих озер Европы. За 60-летний период коэффициенты линейных трендов средней (ТПВ) за теплый период года (июнь-октябрь) в других озерах Севера ЕТР изменялись от 0,21 до 0,29^{0}С/10 лет, возрастая в крупных и глубоких озерах и по мере продвижения с севера на юг региона. Межгодовая изменчивость средних декадных значений (ТПВ) у берега во всех озерах в период летнего прогрева была больше 10^{0}С, а сроков перехода температуры воды через фиксированные значения (4^{0}С и 10^{0}С) больше 30 суток. Наименьшие изменения в термическом режиме озер в течение 60-и летнего периода происходили в северных озерах. Даты перехода (ТПВ)

через 10^0C, которое определяют как «биологическое лето» на всех исследуемых озерах в течение 60-и летнего периода весной сдвигались к более ранним срокам на 1,4–1,7 сут/10 лет, а осенью к более поздним срокам на 1,0–2,3 сут/10 лет.

Заметные тренды (ТПВ) за разные периоды XX в. наблюдались не только в озерах Севера ЕТР, но и центральной России (Груза и др., 2008), Европы (Livingstone, 2009), Северной Америки (Jensen et al, 2007). В озере Байкал за период 1896–2005 гг. по данным гидрологического поста Листвянка также происходил рост средней (ТПВ) в мае-сентябре с трендом 0,085 ^{0}C/10 лет, (Шимараев, 2008).

Ледовый режим

В работе (Karetnikov, Naumenko, 2011) для Ладожского озера показано, что по данным за 1956–2003 гг. ледовый покров в последние годы устанавливается на 1–6 дней за 100 лет, а время вскрытия озера ото льда наступает раньше 14 дней за 100 лет. Для Онежского озера отмечается такая же тенденция. Продолжительность безледоставного периода на Онежском озере возросла в среднем от 215 дней за год в конце XIX в. до 227 дней в среднем за год в настоящее время.

За последние 10 лет продолжительность периода ледостава на озерах разных размеров Севера ЕТР сократилась в среднем на 11–16 суток, по сравнению со средними значениями за весь 60-летний период. Линейные тренды ледовой фенологии для восьми озер Севера ЕТР за период с 1950 г. по 2011 г. показывают за 60-и летний период заметную тенденцию к более поздним срокам установления льда на 2–12 суток и ранним срокам окончания ледостава на 2–8 суток (Ефремова, Пальшин, 2011).

В крупных озерах Севера России Байкал, Ладога, Онего, Таймыр также отмечена тенденция к более ранним срокам разрушения ледового покрова и уменьшению продолжительности ледостава (Водные ресурсы, 2008).

Для большинства озер Северной Америки, Европы и Азии показано, что ледостав на озерах стал начинаться позднее, в среднем 6,3 дн./100 лет; разрушение раньше, в среднем 5,8 дн./100 лет; продолжительность существования ледяного покрова снизилась в среднем на 12 дн. /100 лет (Jensen et al, 2007; Livingstone, et al, 2009).

Сценарии изменения климата в регионе для оценки термогидродинамики озер

Для задания потока тепла и суммарного притока воды в озеро в условиях будущего изменения климата на водосборе озера использовались результаты прогностических расчетов до 2050 г. с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (модель ECHAM 4) при различных сценариях изменения концентрации CO_2 и других парниковых газов в атмосфере (Мелешко и др., 2004; Филатова и др., 2012; Lake Ladoga and Onego, 2010).

Изменения полей течений и температуры воды

При моделировании течений, циркуляция вод озер (система течений), соответствующих средним многолетним за период порядка внешнего водообмена, была названа климатической циркуляцией (Руховец и др., 2011). Циркуляция вод озера, при построении которой тепловой поток задавался на основе максимальных значений, названа теплой. Для теплового потока, определенного по минимальным значениям удельного – холодной и условно соответствовала значениям при похолодании климата. При потеплении климата заметны существенные изменения полей ТПВ (*рис. 2, б*). На поверхности озера в июне месяце нет 4 градусной изотермы, характеризующей термобар. При потеплении до 2^0C гомотермия в озерах в весенний период исчезает на 10 дней раньше, термобар формируется на 20 дней раньше; смещаются сроки образования ледового покрова.

Онежское озеро полностью покрывается льдом в первой половине февраля, тогда как для климатической (среднемноголетней) циркуляции это явление наблюдается в конце декабря – начале января; при потеплении климата уменьшается площадь ледяного покрова, в результате чего скорости течений в зимний период в озерах возрастают за счет дополнительного воздействия поля ветра. Такой тип циркуляции вод в зимний период является типичным для американских Великих озер, расположенных в более теплом климате, чем Ладожское и Онежское озера.

Реакция рыбной части сообщества озер на изменение климата

Изменения температуры воды на рыбную часть сообщества может проявляться как прямо (влияние на инкубацию икры, выживаемость личинок, определяет

границы ареалов распространения различных видов и пр.), так и опосредованно, через изменение условий для роста и развития различных видов, в том числе конкурентных преимуществ отдельных видов в условиях их обитания. Исследовалось влияние изменения климатических условий на численность и видовой состав ихтиофауны на основе данных по уловам рыб в разнотипных озерах Севера ЕТР. Для анализа выбраны наиболее эксплуатируемые по объему добычи рыбы в регионе водоемы, по которым имеются репрезентативные ряды наблюдений: Ладожское, Онежское, Выгозеро, Сямозеро и Водлозеро (*рис. 1*), существенно различающиеся по термогидродинамическому режиму, трофическому статусу и продуктивности. Выделены агрегированные группы осенненерестовых видов рыб (сиг, лосось, палия, форель) и весенненерестовых (семейство карповых и окуневых). Для сравнения были использованы не абсолютные значения уловов, а изменение их структуры по удельному весу видов рыб (процент от общего объема вылова в данном озере), отражающих ихтиофауну озер.

По температурному предпочтению ихтиофауну озер региона можно разделить на три группы рыб: холодноводные (сиги, ряпушка, корюшка, хариус, налим), относительно тепловодные весенненерестовые (синец, густера, лещ, судак), и фоновые или эвритермные (щука, плотва, язь, окунь, ерш и др.), которые мало восприимчивы к температурным изменениям окружающей среды. Были изучены продолжительность «биологического лета», изменения удельного веса в уловах холодноводных и тепловодных видов рыб в исследуемых озерах (*рис. 3*).

Продолжительность «биологического лета» за 60 лет увеличилась в озерах в северной части региона на 10–14 суток (*рис. 3 а*), а в крупных и средних мета- и гипотермических озерах центральной и южной части региона на 17–24 суток. С увеличением числа дней «биологического лета» при потеплении климата на Севере ЕТР роль тепловодных рыб в уловах возрастает, а холодноводных – уменьшается (*рис. 3 б, в*). Для крупного и глубоководного водоема процессы трансформации ихтиофауны под влиянием климатических факторов проходят медленнее, чем в мелководных водоемах. Велика роль в изменениях ихтиофауны и происходящих экономических преобразований. За последние 50 лет заметно увеличение доли вылова теплолюбивых видов в относительно крупных озерах и на востоке региона, в Архангельской области: Кенозеро, Лекшмозеро.

На основании исследований отметим, что для более крупных озер про-

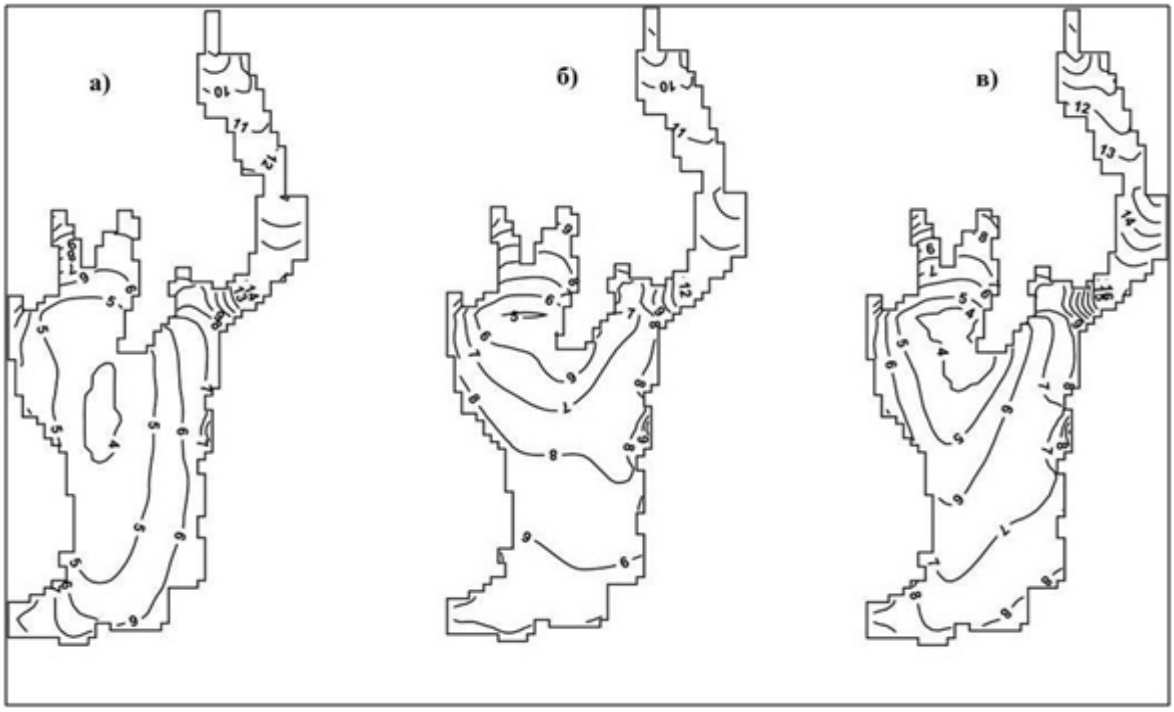


Рис. 2. *Распределение полей ТПВ Онежского озера в июне: а) климатическая циркуляция, б) теплая, в) теплая с повышенным притоком*

цессы трансформации ихтиофауны происходят медленнее.

В работе Шуттера и др. (Sutter et al., 2012) для озер Европы и Северной Америки было показано, что уменьшение продолжительности существования ледяного покрова и изменения термического режима непосредственно влияет на рыбопродуктивность и смертность рыб. Потепление климата приводит к сокращению числа холоднолюбивых видов. Быстрые климатические изменения последних 30 лет сокращают срок адаптатции этих видов к новым условиям, а теплолюбивые виды получают преимущество для развития.

Современные изменения климата и возможное его потепление на Севере ЕТР на 1–3 ^{0}C до 2050 г. могут негативно отразиться на рыбном сообществе озер Севера ЕТР, когда хладолюбивые виды, такие как лосось, сиг и др., замещаются более теплолюбивыми, такими как окунь, плотва и др., что наблюдается также и при эвтрофировании и закислении озер при антропогенном воздействии.

Реакции озерных экосистем на изменения климата и антропогенной нагрузки по результатам моделирования

Комплекс математических моделей экосистем для Ладожского и Онежского озера (Астраханцев и др., 2003, Руховец и др., 2011), основанных на результатах многолетних исследований, был использован для воспроизведения основных особенности круглогодичного функционирования экосистем этих озер. Расчеты показали, что модель экосистемы Онежского озера адекватно воспроизводит круглогодичное функционирование экосистемы, по крайней мере, с точки зрения годовой динамики обобщенной сырой массы фитопланктона. Темпы развития фитопланктона в Онежском озере, если рассматривать биомассу, существенно уступают таковым в Ладожском. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что климатические воздействия лишь незначительно влияют на функционирование экосистемы озер: изменения в развитии фитопланктона значимы только в осенний период, а зоопланктона – более заметны. Можно сделать вывод, что климатические воздействия лишь несколько усиливают или ослабляют роль современных изменений биогенной нагрузки. В то же время отметим, что по данным моделирования при дальнейшем потеплении климата в Великих озерах Европы возможно снижение биомассы фитопланктона, особенно в осенний период, так как водоросль *Aulacosira islandica,* которая дает главный вклад в биомассу фитопланктона и развивается только при температуре воды, не превышающей 8 ^{0}C.

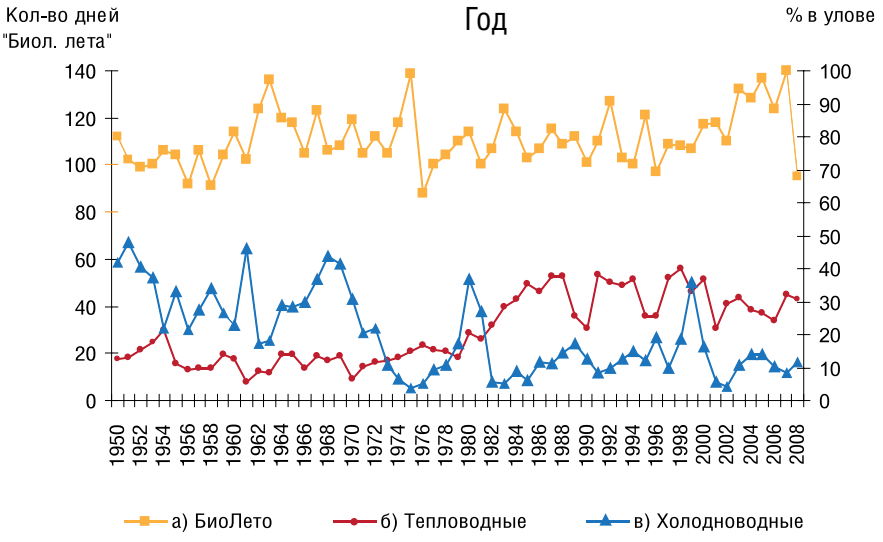


Рис. 3. Динамика продолжительности «биологического лета» (а) и удельного веса (% общего улова) тепловодных (б) и холодноводных видов (в) в оз. Водлозеро (1950–2008 г.г.)

Особенности изменения озер Восточной Антарктиды

Изучено современное состояние и изменения 27 озер различных типов в трех антарктических оазисах Восточной Антарктиды (ВА), расположенных в районах российских станций Молодежная, Новолазаревская и Прогресс (*рис.1 б*). При сравнении полученных нами результатов с предыдущими исследованиями (Симонов, 1971; MacNamara, 1970) отметим, что в озерах оазиса Холмы Тала (ст. Молодежная) заметного изменения в распределении гидрофизических и гидрохимических характеристик озер не выявлено. Одним из ярких индикаторов изменения климата Антарктиды является многолетняя динамика изменчивости толщины и площади покрытия озерного льда в теплый период. На исследованных озерах ВА, вскрывающихся в последние годы ото льда, устанавливается изотермия водной массы с температурой

по вертикали 0,5 ^{0}C, что примерно на 3 ^{0}C ниже по сравнению с озерами, постоянно покрытыми льдом. В оазисе Ширмахера (ст. Новолазаревская) в настоящее время наблюдается дегляциация (Федорова и др., 2010), уровень воды озер здесь понижается при потеплении климата, о чем свидетельствует переход некоторых озер из разряда невскрывающихся в разряд озер свободных ото льда в летнее время, и изменение конфигурации некоторых озер с 70-х гг. XX в. В оазисе Холмы Ларсеманн (ст. Прогресс) исследованы несколько озер с глубинами до 5 м. Эти озера на момент измерения были покрыты льдом, и в них наблюдалась обратная стратификация температуры воды. Гидрофизические параметры озер этого оазиса и их биологические характеристики, полученные нами в 2010–2011 гг. в целом согласуются с результатами предыдущих исследований (Симонов, 1971).

Слоистая структура донных осадков озер ВА объясняется различной интенсивностью роста водорослей и цианобактерий в течение года и может использоваться для определения возраста осадков и оценки климатических изменений. На дне некоторых озер Антарктиды ранее был обнаружен мох. В оазисе Холмы Тала нами не было найдено ни одного озера с содержанием мха в донных пробах, в то время как в озерах оазисов Ширмахера и Холмы Ларсеманн они встречаются во многих водоемах. Оптические свойства воды и льда исследованных озер Антарктиды позволяют проходить достаточному количеству света до глубины свыше 30 м, что обеспечивает, совместно с постоянной температурой воды около 4 ^{0}C, хорошие условия для развития цианобактериальных матов и мха на дне озер. Учитывая, что продукционные процессы связаны с температурными условиями, в безледный период в озерах ВА при потеплении климата наблюдается не повышение, а снижение биологической активности организмов, что является основным отличием от озер Севера ЕТР.

Причина отсутствия заметных проявлений потепления климата в оазисе Холмы Тала и наблюдаемые тенденции заметного потепления в оазисе Ширмахера может заключаться в том, что в оазисе Ширмахера ярко выражен процесс десквамации (Симонов, 1971), а в оазисе Холмы Тала горные породы более устойчивы к такого рода выветриванию, и увлажнение территории временными водотоками выражено гораздо хуже. Поэтому химическое и физическое выветривание в оазисе Ширмахера происходит интенсивнее, в результате чего в тело ледников попадает большее количество мелкодисперсного материала, ослабляющего альбедо льда и увеличивающего поглощение ледниками и снежниками солнечной радиации.

Наблюдаемые тенденции изменения климата в Восточной Антарктиде за последние 40–50 лет неоднородны. В оазисах Холмы Тала и Холмы Ларсеманн заметного влияния климата на изменения экосистем озер не выявлено, в отличие от оазиса Ширмахера из-за геологических особенностей региона. При потеплении климата здесь отмечается не увеличение, а снижение биологической активности организмов. В этом в настоящее время проявляется отличие от озер Севера ЕТР.

Литература

1. ***Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А.*** Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. Под ред. Л.А. Руховца. – СПб: 2003. – Наука. – 364 с.
2. ***Водные ресурсы России и их использование.*** Ред. И.А. Шикломанов. Санкт-Петербург. – 2008. – 598 с.
3. ***Ефремова Т.В., Пальшин Н.И.*** Сроки ледовых явлений на водоемах Северо-Запада России. Метеорология и гидрология. – 2011, № 8. – С. 89–98.
4. ***Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее*** Под ред. В.А. Румянцева и В.Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002. – 327 с.
5. ***Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Малевский-Малевич С.П., Надежина Е.Д., Спорышев П.В.*** Антропогенные изменения климата в 21 веке в Северной Евразии // Метеорология и гидрология. – 2004, № 7. – С. 5–26.
6. ***Онежское озеро.*** Атлас. Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: Кар.НЦ РАН. – 2010. – 151 с.
7. ***Петрова Л.П., Кудерский Л.А.*** Водлозеро: природа, рыбы, рыбный промысел. – Петрозаводск. – 2006. – 196 с.
8. ***Руховец Л.А., Петрова Н.А., Меншуткин В.В., Астраханцев Г.П, Минина Т.Р., Полосков В.Н., Петрова Т.Н., Сусарева О.М.*** Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки // Водные ресурсы. – Том 38, № 6. – 2011. – С. 740–752.
9. ***Симонов И.М.*** Оазисы восточной Антарктиды. – Л., Гидрометеоиздат. – 1971. – 176 с.
10. ***Тихомиров А.И.*** Термика крупных озер. – Л.: Наука, 1982. – 232 с.
11. ***Филатов Н.Н.*** Гидродинамика озер. – СПб.: НаукА. – 1991. – 200 с.
12. ***Филатов Н.Н., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Назарова Л.Е., Пальшин Н.И. Руховец Л.А., Толстиков А.В., Шаров А.Н.*** Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата. – ДАН. – № 444, № 5. – 2012. – С. 554–557.
13. ***Федорова И.В., Анисимов М.А., Саватюгин Л.М., Азарова Н.С.*** Изменение гидрографической сети оазиса Ширмахера (Восточная Антарктида) в условиях дегляциации. – Лед и снег. – 2010, Вып. 60, № 3. – С. 63–69.

14. Шимараев М.Н.
О влиянии Северо-Атлантического колебания (NAO) на ледово-термические процессы на Байкале. Доклады Академии наук. – 2008. – 423, № 3. – С. 397–400.

15. Adrian R., O'Reilly C., Zagarese H., Baines S.B., Hessen D.O., Keller W., Livingstone D.M., Sommaruga R., Straile D., Donk E.V., Weyhenmeyer G.A., Winder M.
Lakes as sentinels of climate change. Limnol. Oceanogr. – 2009. – 54 (6, part 2). – P. 283–297.

16. Jensen O.P., Benson B.J., Magnuson J.J., Card V.M., Futter M.N., Soranno P.A., Stewart K.M.
Spatial analysis of ice phenology trends across the Laurentian Great Lakes region during a recent warming period. Limnol. Oceanogr. – 2007. – 52. – P. 2013–2026.

17. Karetnikov S., Naumenko M.
Lake Ladoga ice phenology: Mean condition and extremes during the last 65 years. Hydrol. Process. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.8048. – 2011.

18. Ladoga and Onego – Great European Lakes:
Modeling and Experiment. Rukhovets L., Filatov N., (Eds.). London. Springer-Praxis. – 2010. – P. 302.

19. Livingstone D.M., Adrian R., Blenchner T., George G., Weyhwenmeyer G.A.
Lake ice phenology. The impact of Climate Change on European Lakes. Springer. – 2009. – 507 p.

20. MacNamara E.E.
Some limnological observations from Enderby Land, Antarctica // Limnology and Oceanography. – Vol. 15, № 5. – 1970. – P. 768–775.

English

Impact of climate change on lake ecosystems *

Nikolay N. Filatov – RAS Corresponding Member, Director of the Northern Water problems institute RAS, Karelian Scientific Center, Av. 50, A.Nevskogo, St.Petersburg, 185030, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru.

Leonid A. Rukhovets – Professor, Doctor of Physics and Mathematics, Institute for Economics and Mathematics at St.Petersburg, RAS
1, st. Chaikovskogo, St.Petersburg, 191187, Russia
e-mail: leor@emi.nw.ru.

Vyacheslav N. Baklagin – Candidate of Technical Sciences, junior research scientist at the RAS Northern Water problems institute, RAS, Karelian Scientific Center, Av. 50, A.Nevskogo, St.Petersburg, 185030, Russia
e-mail: slava.baklagin@mail.ru

Andrei P. Georgiyev - Candidate of Biological Sciences, research scientist at the RAS. Northern Water problems institute, RAS, Karelian Scientific Center, Av. 50, A.Nevskogo, St.Petersburg, 185030, Russia
e-mail: a-georgiev@mail.ru.

Tatyana V. Yefremova - Candidate of Geographical Sciences, research scientist at the RAS. Northern Water problems institute, RAS, Karelian Scientific Center, Av. 50, A.Nevskogo, St.Petersburg, 185030, Russia
e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru.

Nikolay I. Palshin - Candidate of Geographical Sciences, senior research scientist at the RAS. Northern Water problems institute, RAS, Karelian Scientific Center, Av. 50, A.Nevskogo, St.Petersburg, 185030, Russia
e-mail: npalshin@mail.ru.

Alexey V. Tolstikov - Candidate of Geographical Sciences, research scientist at the RAS. Northern Water problems institute, RAS, Karelian Scientific Center, Av. 50, A.Nevskogo, St.Petersburg, 185030, Russia
e-mail: alexeytolstikov@mail.ru

Larissa Y. Nazarova - Candidate of Geographical Sciences, senior research scientist at the RAS. Northern Water problems institute, RAS, Karelian Scientific Center, Av. 50, A.Nevskogo, St.Petersburg, 185030, Russia
e-mail: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru.

Andrey N. Sharov - Candidate of Biological Sciences, senior research scientist at the RAS. Northern Water problems institute, RAS, Karelian Scientific Center, Av. 50, A.Nevskogo, St.Petersburg, 185030, Russia
e-mail: sharov_an@mail.ru

Abstract

The features of the climate change impact to the ecosystems of lakes located in a fairly strong anthropogenic influence on the example of the lakes of the North European part of Russia and to the weak impact of the lakes in East Antarctica (EA) were studied.

Keywords: lakes, climate, biota, ecosystems, measuring, modeling.

** The work was financially supported by RFBR (project № 10-05-00963).*

References

1. ***Astrahancev G.P., Menshutkin V.V., Petrova N.A., Ruhovec L.A.***
Modelirovanie jekosistem bol'shih stratificirovannyh ozer. Pod red. L.A. Ruhovca. – SPb: 2003. – Nauka. – 364 p.
2. ***Vodnye resursy Rossii i ih ispol'zovanie.***
Red. I.A. Shiklomanov. Sankt-Peterburg. – 2008. – 598 p.
3. ***Efremova T.V., Pal'shin N.I.***
Sroki ledovyh javlenij na vodoemah Severo-Zapada Rossii. Meteorologija i gidrologija. – 2011, № 8. – p. 89–98.
4. ***Ladozhskoe ozero – proshloe, nastojashhee, budushhee***
Pod red. V.A. Rumjanceva i V.G. Drabkovoj. – SPb.: Nauka, 2002. – 327 p.
5. ***Meleshko V.P., Katcov V.M., Govorkova V.A., Malevskij-Malevich S.P., Nadezhina E.D., Sporyshev P.V.***
Antropogennye izmenenija klimata v 21 veke v Severnoj Evrazii // Meteorologija i gidrologija. – 2004, № 7. – p. 5–26.
6. ***Onezhskoe ozero.***
Atlas. Otv. red. N.N. Filatov. Petrozavodsk: Kar.NC RAN. – 2010. – 151 s.
7. ***Petrova L.P., Kuderskij L.A.***
Vodlozero: priroda, ryby, rybnyj promysel. – Petrozavodsk. – 2006. – 196 p.
8. ***Ruhovec L.A., Petrova N.A., Menshutkin V.V., Astrahancev G.P, Minina T.R., Poloskov V.N., Petrova T.N., Susareva O.M.***
Issledovanie reakcii jekosistemy Ladozhskogo ozera na snizhenie fosfornoj nagruzki // Vodnye resursy. – Tom 38, № 6. – 2011. – p. 740–752.
9. ***Simonov I.M.***
Oazisy vostochnoj Antarktidy. – L., Gidrometeoizdat. – 1971. – 176 p.
10. ***Tihomirov A.I.***
Termika krupnyh ozer. – L.: Nauka, 1982. – 232 p.
11. ***Filatov N.N.***
Gidrodinamika ozer. – SPb.: NaukA. – 1991. – 200 p.
12. ***Filatov N.N., Georgiev A.P., Efremova T.V., Nazarova L.E., Pal'shin N.I. Ruhovec L.A., Tolstikov A.V., Sharov A.N.***
Reakcija ozer Vostochnoj Fennoskandii i Vostochnoj Antarktidy na izmenenija klimata. – DAN. – № 444, № 5. – 2012. – S. 554–557.
13. ***Fedorova I.V., Anisimov M.A., Savatjugin L.M., Azarova N.S.***
Izmenenie gidrograficheskoj seti oazisa Shirmahera (Vostochnaja Antarktida) v uslovijah degljaciacii. – Led i sneg. – 2010, Vyp. 60, № 3. – p. 63–69.
14. ***Shimaraev M.N.***
O vlijanii Severo-Atlanticheskogo kolebanija (NAO) na ledovo-termicheskie processy na Bajkale. Doklady Akademii nauk. – 2008. – 423, № 3. – p. 397–400.
15. ***Adrian R., O'Reilly C., Zagarese H., Baines S.B., Hessen D.O., Keller W., Livingstone D.M., Sommaruga R., Straile D., Donk E.V., Weyhenmeyer G.A., Winder M.***
Lakes as sentinels of climate change. Limnol. Oceanogr. – 2009. – 54 (6, part 2). – P. 283–297.
16. ***Jensen O.P., Benson B.J., Magnuson J.J., Card V.M., Futter M.N., Soranno P.A., Stewart K.M.***
Spatial analysis of ice phenology trends across the Laurentian Great Lakes region during a recent warming period. Limnol. Oceanogr. – 2007. – 52. – P. 2013–2026.
17. ***Karetnikov S., Naumenko M.***
Lake Ladoga ice phenology: Mean condition and extremes during the last 65 years. Hydrol. Process. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.8048. – 2011.
18. ***Ladoga and Onego – Great European Lakes:***
Modeling and Experiment. Rukhovets L., Filatov N., (Eds.). London. Springer-Praxis. – 2010. – P. 302.
19. ***Livingstone D.M., Adrian R., Blenchner T., George G., Weyhwenmeyer G.A.***
Lake ice phenology. The impact of Climate Change on European Lakes. Springer. – 2009. – 507 p.
20. ***MacNamara E.E.***
Some limnological observations from Enderby Land, Antarctica // Limnology and Oceanography. – Vol. 15, № 5. – 1970. – P. 768–775.

Влияние стратификации на седиментационные потоки в долинном водохранилище *

Кременецкая Е.Р., Бреховских В.Ф., Вишневская Г.Н., Ломова Д.В., Перекальский В.М., Соколов Д.И.

В результате многолетних экспериментальных исследований на Можайском водохранилище получены величины седиментационных потоков в летний период. Показано влияние степени стратифицированности водной толщи на интенсивность осаждения взвешенного вещества. Рассчитаны ориентировочные балансы взвешенного и органического вещества. Разработана модель режима взвешенного вещества в водохранилище долинного типа.

Ключевые слова: седиментация, стратификация, водохранилище

** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-05-00675).*

Материалы и методы исследований

Работы по исследованию седиментационных потоков и факторов, их определяющих (содержание взвешенного вещества (ВВ), продукционно-деструкционные процессы, гидрометеохарактеристики, характеристики донных отложений (ДО)), проводились на Можайском водохранилище в 2008–2011 гг. Можайское водохранилище (относительно глубоководное водохранилище долинного типа) имеет вытянутую в плане акваторию с чередованием более узких и расширенных (плесов) участков. Морфометрической особенностью долинных водохранилищ является сочетание двух отрицательных, врезанных одна в другую, форм рельефа. Относительная глубоководность водохранилища обеспечивает наличие температурной стратификации в летний период.

Изучение характеристик экосистемы Можайского водохранилища основывалось на данных квазисинхронных гидролого-гидрохимических и грунтовых съемок всего водохранилища и Красновидовского плеса, расположенного в средней его части.

Комплекс работ, проводимых на станциях, включал измерения прозрачности воды, температуры, электропроводности, содержания кислорода, отбор проб для определения растворенного в воде кислорода, перманганатной (ПО) и бихроматной окисляемостей (БО), мутности воды и количества в ней взвесей (ВВ), наблюдения за метеоусловиями.

Исследования седиментационных потоков (СП) осуществлялись методом ловчих стаканов [3]. Седимента-

КРЕМЕНЕЦКАЯ Екатерина Рифовна
кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем РАН.

БРЕХОВСКИХ Вадим Феодосьевич
профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института водных проблем РАН.

ВИШНЕВСКАЯ Галина Николаевна
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем РАН.

ЛОМОВА Диана Владиславовна
кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных проблем РАН.

ПЕРЕКАЛЬСКИЙ Владимир Михайлович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем РАН.

СОКОЛОВ Дмитрий Игоревич
научный сотрудник Красновидовской учебно-научной базы географического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

ционные ловушки устанавливались в 2-3 точках плеса, характеризующих различные формы рельефа дна (русловая ложбина, затопленные пойма и надпойменная терраса). В средней части водохранилища проводились наблюдения за продукционно-деструкционными процессами (на 6 горизонтах). Изучался состав и численность зоопланктона.

При анализе результатов наблюдений использовались данные об уровенном режиме, ежедневном притоке и сбросе воды, а также атмосферных осадках, полученные на Можайском гидроузле и на гидрометеорологическом посту Красновидовской УНС МГУ.

Экспериментальными наблюдениями был охвачен широкий диапазон гидрометеорологических условий: уровень воды в водохранилище в период наблюдений изменялся от крайне низкого (-6,5 м от НПУ) до практически полного заполнения водохранилища, условный коэффициент водообмена изменялся от 0,06 до 0,95 мес-1, температура верхнего слоя воды – от 14,5 до 28,9 °С, величина максимального градиента температур в слое скачка – от 0,5 до 5,5°С/м, прозрачность воды по диску Секки – от 0,5 до 2,3 м.

По результатам экспериментов были рассчитаны ориентировочные балансы взвешенного и органического вещества в среднем районе Можайского водохранилища. Уровень воды во время экспериментов был ниже НПУ, из-за чего прибрежная зона абразионных берегов представляла собой аккумулятивную отмель, сложенную крупно- и среднезернистым песком, лишенным органических частиц грунта. Поэтому в воде плеса отсутствовала взвесь абразионного генезиса. Балансовое уравнение для взвешенного вещества включало в себя продукцию фито- и зоопланктона, поступление ВВ с боковым притоком, приток взвеси из вышележащего района и отток ее в нижележащий район, седиментацию. Взмучивание ДО определялось как невязка баланса.

Баланс ОВ для Красновидовского плеса, где макрофиты присутствуют в малом количестве, включал в себя суммарную продукцию фитопланктона, продукцию зоопланктона, поступление ОВ с боковым притоком, взмучивание ОВ донных отложений, поступление ОВ из вышележащих районов, седиментация ОВ, сток ОВ в нижележащую часть водохранилища, деструкцию ОВ в толще воды и ДО. В невязку баланса были отнесены продукция бактериопланктона и детрит.

Седиментационные потоки в Можайском водохранилище

Анализ колебаний величин СП на разных морфоучастках затопленной речной долины показал, что в среднем за вегетационный сезон минимальные значения СП в ДО (12-66 г/м^{2}сут) наблюдались на пойменных участках. Высокие значения СП (до 94 г/м^{2}сут) на мелководьях (надпойменная терраса) объясняются волновым взмучиванием ДО, состоящих, преимущественно, из песчанистых частиц, которые быстро оседают, не перемещаясь вглубь плеса. Кроме того, вблизи берега на величину СП влияют преимущественно ВВ, поступающие со склоновым стоком, на что указывает положительная связь величины СП со слоем воды, выпавшей на побережье в дождливые дни (r^2=0,65 при n=7). С удалением от берега влияние склонового стока снижается, большее значение приобретает концентрация ВВ в придонном слое, увеличение которой приводит к интенсификации СП. На станциях, расположенных в русловой ложбине, отмечались максимальные значения СП (до 250 г/м^{2}сут). Основную роль в формировании потока осадочного материала здесь играет содержание ВВ в придонной воде.

Придонные ловушки, расположенные на участках затопленных поймы и надпойменной террасы улавливают преимущественно взвесь, осаждающуюся из водной толщи. Перемещающееся в придонном 0,5 метровом слое воды вещество не попадается в эти придонные ловушки, т.к. высота ловчего стакана составляет 70 см. Ловушки, расположенные на дне русловой ложбины, кроме оседающей взвеси (вертикальной составляющей СП) улавливают и «стекающее» с бровки русловой ложбины вещество взмученных на пойме ДО, т.е. квазигоризонтальную придонную составляющую седиментационного потока взвешенного вещества.

Если принять, что на пойменных станциях происходит преимущественно вертикальный перенос осаждающегося вещества, поступившего в толщу воды в результате взмучивания ДО и образовавшегося в процессе жизнедеятельности фитопланктона (коэффициент корреляции величины СП на пойменных станциях с мутностью верхнего 2-х метрового слоя воды равен 0,73, при n=8), то можно оценить вертикальную составляющую седиментационного потока в

русловую ложбину ($СП_в$) по формуле:

$$СП_в = СП_п / Н_п \bullet Н_р,$$

где $Н_п$ и $Н_р$ – глубины пойменного и руслового участков.

Разница в средней концентрации взвеси на четырех пойменных станциях и среднего содержания ВВ над русловой ложбиной (до глубины, соответствующей глубинам пойменных станций) не превышала 4%. Величина рассчитанной таким образом вертикальной составляющей СП для всех имеющихся данных уменьшалась с ростом стратифицированности водной толщи (r=-0.79, n=24).

По разнице суммарного СП в русловую ложбину и его вертикальной составляющей оценена горизонтальная составляющая ($СП_г$) в ДО русловой ложбины. Вклад оцененной таким образом квазигоризонтальной составляющей СП изменялся от 0-10 до 50-75% суммарного потока в ДО русловой ложбины (рис. 1).

Как видно на рис. 1, на формирование придонного квазигоризонтального потока влияет положение пикноклина (толщина гиполимниона). При наличии однородного гиполимниона в придонной области величина квазигоризонтального СП в русловую ложбину достигала максимальных величин. При заглублении пикноклина практически до дна и увеличении толщины перемешанного слоя воды наблюдались минимальные величины $СП_г$, т.к. высокая устойчивость пикноклина к перемешиванию препятствует развитию придонных компенсационных течений.

Чтобы оценить величину седиментационного потока в толще воды, параллельно с придонной ловушкой, расположенной в русловой ложбине устанавливались и ловушки, подвешенные в толще воды.

В эпилимнионе величина СП менялась от 0.7 до 7.4 г/м^{2}сут, в металимнионе – от 1.4 до 12.3 г/м^{2}сут, а на уровне бровки русловой ложбины – от 4.1 до 47 г/м^{2}сут, причем на всех горизонтах происходило увеличение СП в ветреные дни и при ослаблении стратифицированности водной толщи.

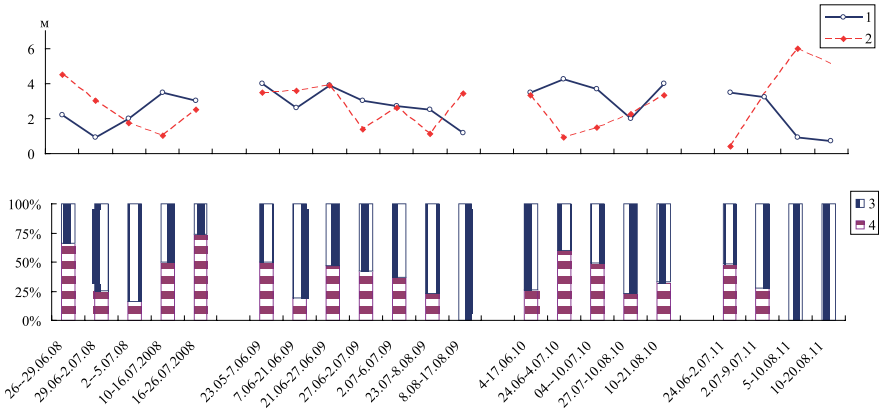


Рис. 1. *Изменение мощности гиполимниона (1), толщины перемешанного слоя воды (2) и соотношения вертикальной (3) и придонной квазигоризонтальной (4) составляющих СП в ДО русловой ложбины в Можайском водохранилище*

Корреляционный анализ показал, что на всех станциях и горизонтах наблюдаются статистически значимые зависимости СП от содержания ВВ (r=0,46 при n=97), среднего по вертикали градиента температур, показывающего стратифицированность водной толщи (r = -0,53 при n = 97) и содержания ОВ в осадке ловушек (r = -0,40 при n = 97).

Баланс взвешенного вещества в Можайском водохранилище в летний период

Особенности распределения взвешенного вещества в водохранилище определяются морфометрическими особенностями ложа и динамикой водных масс [7].

Анализ полученных многолетних данных показал, что запас взвешенного вещества в водной толще находится в прямой зависимости от интенсивности ветрового воздействия. Причем при одинаковой скорости ветра запас взвеси тем выше, чем больше толщина перемешанного слоя воды, т.к. чем она больше, тем большая площадь донных отложений подвержена ветро-волновому взмучиванию.

Оцененные на основе расчетов ориентировочных балансов взвешенного вещества величины взмучивания донных отложений изменялись в пределах от 1,5 до 177 т/км^2 (рис. 2). Даже при сильной стратификации водной толщи и невысоких скоростях ветра в изолированном гиполимнионе происходило взмучивание ДО, которое вносило от 27 до 50% приходной части баланса ВВ. Увеличение ветрового воздействия, особенно при похолодании, приводило к тому, что вклад взмучивания ДО достигал 95%.

Корреляционный анализ выявил статистически достоверные зависимости изменений величины взмучивания ДО от скорости ветра (r=0,89, n=16), толщины

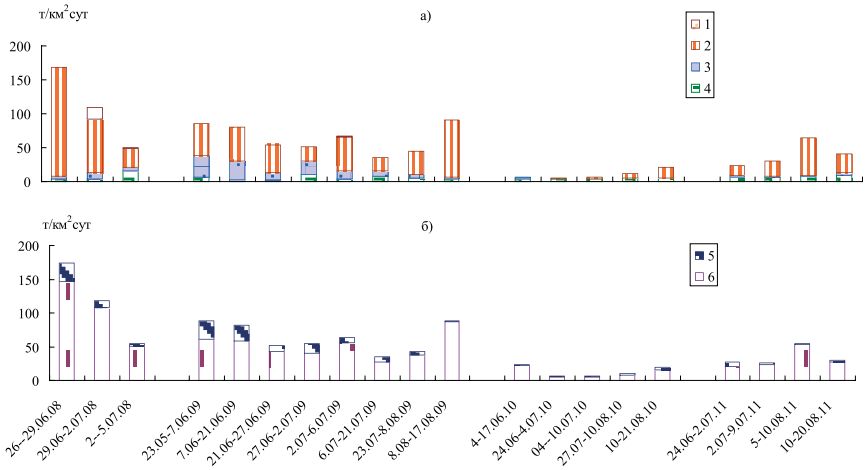


Рис. 2. *Изменение составляющих приходной (а) и расходной (б) частей баланса ВВ в Красновидовском плесе Можайского водохранилища во время проведения экспериментов в 2008–2011 гг. (1 – боковой приток, 2 – взмучивание ДО, 3 – приток взвеси, 4 – валовая продукция фито- и зоопланктона, 5 – сброс взвеси в нижележащий район, 6 – седиментация)*

перемешанного слоя воды (r=0,65, n=16), средней глубины исследуемого района (r=-0,68, n=16) и среднего вертикального градиента температур воды (r=-0,68, n=16). Учет всех этих параметров позволяет довольно точно оценивать величину взмучивания ДО [6].

Вклад продукции фито- и зоопланктона в приходную часть баланса ВВ изменялся от 2 до 63 %, увеличиваясь в периоды усиления стратификации (r=0,8, n=16).

Основной расходной составляющей баланса ВВ в среднем районе Можайского водохранилища была седиментация. Лишь в периоды повышенной проточности водохранилища при пропускании паводков вклад оттока ВВ в нижележащие районы достигал 30%. Величина седиментации ВВ в среднем районе водохранилища изменялась от 5.5 до 147 т/км^{2}сут. Как видно на *рис. 3*, доля ежесуточно осаждающего вещества от общего количества взвеси уменьшается с ростом стратифицированности водной толщи. Вероятно, это связано с изменением состава взвеси. Усиление стратификации водной толщи приводило к увеличению доли органического вещества (ОВ) в составе осадка ловушек (r=0,86, n=16). Превышение седиментации над общим

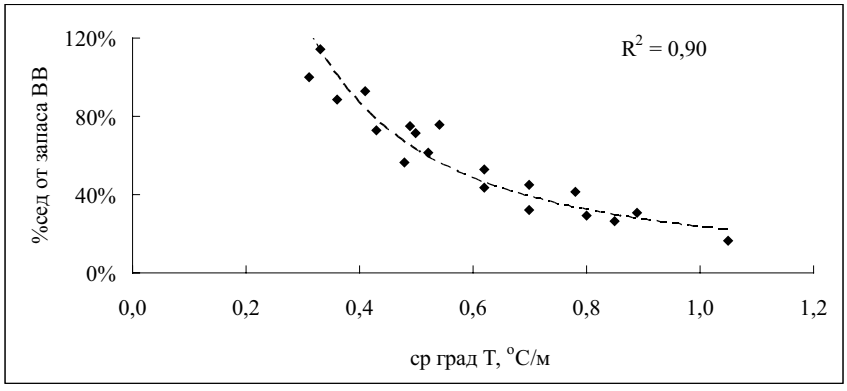


Рис. 3. *Зависимость отношения среднесуточной седиментации к общему запасу ВВ (доли осевшей взвеси) от среднего вертикального градиента температуры воды*

количеством ВВ при низкой стратификации может быть вызвано преобладанием процесса взмучивания над седиментацией в этот период.

Баланс органического вещества в Можайском водохранилище

На основе проведенных в 2009 г. комплексных исследований в Красновидовском плесе Можайского водохранилища были рассчитаны ориентировочные балансы ОВ. Невязка баланса ОВ, в которую входят продукция бактерий (Пбакт) и детрит, достигает в отдельные периоды 11%, причем увеличение доли недоучтенного вещества от начального запаса ОВ совпадает с ростом вклада деструкции ОВ в толще воды (r=0,91, n=7). Это связано с тем, что поверхность детрита заселялась бактериями, образующими агрегации, что приводило к повышению интенсивности деструкционных процессов [9]. Для всех случаев отмечалось увеличение среднесуточной невязки, включающей в себя продукцию бактериопланктона и образование детрита, с ростом стратифицированности водной толщи (r=0,91, n=8) и уменьшением толщины перемешанного слоя воды (r=–0,96, n=8).

Основную долю (в среднем за лето более 60%) в балансе ОВ составил приток – отток ОВ.

Это связано с тем, что большая часть ОВ в воде Можайского водохранилища находится в растворенной форме [4]. Доля валовой первичной продукции фитопланктона (ППвал) в приходной части баланса летом ОВ 2009 г. составляла от 3 до 22% (в среднем за лето – 13,6%), увеличиваясь в период усиления стратификации водной толщи. Коэффициент корреляции ППвал от среднего за период максимального градиента плотности составлял 0,70, при n=8. Вклад продукции зоопланктона в приходную часть баланса ОВ менялся в течение лета от 0,9 до 4,1% (в среднем 2,0%).

Вклад взмучивания ОВ, находящегося в верхнем слое ДО, изменялся от

5 до 20%. И лишь в конце лета в период массового отмирания синезеленых водорослей при высокой ветровой активности и снижении притока достигал 46%. Поступление аллохтонной органики с боковым притоком не превышало 4%. В расходной части баланса ОВ Красновидовского плеса после оттока ОВ в нижележащий район, составившего в среднем за лето 2009 г. 63%, основными частями являются седиментация ОВ (16%) и деструкция ОВ в толще воды (20%). Наибольшие величины седиментации ОВ отмечены в периоды с высокими скоростями ветра (корреляция между этими величинами r=0,92, n=8). Увеличение вклада взмучивания ОВ в ДО приводит не только к увеличению доли седиментации ОВ в балансе (r=0,86, n=8), но также увеличивается и вклад деструкции ОВ в толще воды (r=0,87, n=8). На тонкодисперсных минеральных илистых частицах взмученных ДО образуются колонии бактерий, потребляющих растворенное в водной толще ОВ [7], что приводит к увеличению деструкции в толще воды.

Корреляционный анализ влияния гидрофизических факторов на изменение характеристик фитопланктона показал, что ППвал уменьшается при ветреной погоде (r= –0,74, n=8) и увеличении Нпер при похолодании (r= –0,83, n=8) за счет повышения мутности воды при взмучивании ДО, что также негативно сказывается на биомассе фитопланктона (r=0,61, n=8).

Таким образом, увеличение стратифицированости водной толщи приводит к увеличению запаса ОВ в ней за счет роста продукции фито- и бактериопланктона и увеличении количества детрита.

Моделирование режима взвешенного вещества Можайского водохранилища

На основе полученных эмпирико-статистических зависимостей была разработана модель формирования режима взвешенного вещества в водохранилище [5].

Программный комплекс разработан в двумерной по вертикали постановке. Используется нестационарная система уравнений гидродинамики и массопереноса, усредненных по ширине водоема. В уравнениях массопереноса в качестве искомых скалярных функций являются температура, концентрация взвешенного вещества. В качестве факторов, влияющих на решение задачи, рассматриваются известные натурные суточные изменения скорости и направления ветра, изменение температуры и влажности воздуха, взаимодействие с атмосферой, влияние фотосинтеза, поступление взвесей из донных отложений, осаждение взвешенных частиц. Гидродинамические характеристики потока (компоненты скорости) рассчитываются с учетом термохалинных полей в водоеме, морфологии русла, изменения уровня свободной поверхности [8]. Поступление и уменьшение содержания взвесей за счет взмучивания ДО, фотосинтеза, оседания взвеси определялось по статистическим зависимостям, полученных в результате обработки данных экспериментальных наблюдений [2, 5].

В качестве критерия достоверности модельных расчетов был определен использующийся в гидрологических расчетах показатель S/σ – отношение среднеквадратической погрешности S к стандартному среднеквадратическому отклонению σ ряда наблюдений [1]. Критерий качества расчета по модели $S/\sigma = 0{,}62$ свидетельствует об удовлетворительном качестве расчетов.

Заключение

Таким образом, влияние стратификации на интенсивность седиментационных потоков в долинном водохранилище заключается в том, что при усилении устойчивости водной толщи к перемешиванию в составе взвеси уменьшается доля минеральных частиц взмученных донных отложений и повышается доля автохтонной органики (в том числе и за счет развития синезеленых водорослей, обладающих плавучестью) и детрита, скорость оседания которых невелика. Положение пикноклина влияет на соотношение вертикальной (взвесь осаждается из водной толщи) и квазигоризонтальной (взвешенное вещества перемещается в придонной области) составляющих седиментационного потока в русловую ложбину долинного водохранилища.

Литература

1. ***Бефани Н.Ф., Калинин Г.П.***
Упражнения и методические разработки к гидрологическим прогнозам. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 320 с.
2. ***Бреховских В.Ф., Кременецкая Е.Р.***
«О связи валовой первичной продукции фитопланктона с некоторыми гидрофизическими характеристиками / Водные ресурсы, 2000. Т.27. №4. С.445-448.
3. ***Дубовская О.П.***
Методологические основы использования седиментационных ловушек в морских и континентальных водоёмах (обзор) // Гидробиол. журн., 2002. Т. 38. № 5. С. 98–110.
4. ***Комплексные исследования водохранилищ.***
М.: Изд-во МГУ, 1979. Вып. 3: Можайское водохранилище. 400 с.
5. ***Кременецкая Е.Р., Перекальский В.М., Ломова Д.В.***
О роли взмучивания донных отложений в балансе взвешенного вещества в Можайском водохранилище в летний период // Вода: химия и экология, 2013. № 2. С. 12-18.
6. ***Ломова Д.В., Кременецкая Е.Р., Исупова М.В.***
Формирование седиментационных потоков в долинном водохранилище // Современные проблемы водохранилища и их водосборов (Труды Международной научно-практической конф.). Пермь: ПГУ, 2011 г. т. 1. С. 105-109.
7. ***Мартынова М.В.***
Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 243 с.
8. ***Перекальский В.М., Кременецкая Е.Р.***
Математическое моделирование термогидродинамического и кислородного режимов водоемов // Метеорология и гидрология, 2007. № 6 . С 60-72.
9. ***Садчиков А.П.***
Трансформация органического вещества бактериальным сообществом в водоемах разной трофности// Гидробиол. Журн. 2001. Т.37, № 3. С.87–92.

English

Influence of stratification on sediment flows in a valley reservoir*

Ekaterina R. Kremenetskaya– Candidate of Geographic Sciences, senior research scientist at the Water Problems Institute RAS, 3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia e-mail: ekrem@front.ru.

Vadim F. Brekhovskikh– Professor, Doctor of Technical Sciences, senior research scientist at the Water Problems Institute RAS, 3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia e-mail: vadim@aqua.laser.ru.

Galina N. Vishnevskaya – Candidate of Physical and Mathematical Schiences, senior research scientist at the Water Problems Institute RAS, 3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia e-mail galvish@aqua.laser.ru.

Diana V. Lomova – Candidate of Geographical Sciences, research scientist at the Water Problems Institute RAS, 3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia e-mail: florainter@mail.ru.

Vladimir M. Perikalsky– Candidate of Physical and Mathematical Schiences, senior research scientist at the Water Problems Institute RAS, 3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia e-mail: hugo@aqua.laser.ru.

Dmitry I. Sokolov – research scientist at Krasnovidovo field station of the Geography Department, Lomonosov Moscow State University, 5, Zelenaya str., Moscow region, Mozhaisk district, Krasnovidovo, 143221, Russia e-mail: fabuliste@list.ru.

Abstract

On the basis of longterm experimental investigations on Mozhaisk reservoir the quantity of sedimental fluxes in summer time are obtained. There is shown the influence of water body stratification degree on suspended matter settling intensity. The oriental suspended and organic matter balances are calculated. There is developed the model of suspended matter regime at valley reservoir.

Keywords: sedimentation, stratification, reservoir.

References

1. ***Befani N.F., Kalinin G.P.***
Uprazhnenija i metodicheskie razrabotki k gidrologicheskim prognozam.[Exercises and methodological developments on hydrological forecasts]. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 320 p.
2. ***Brehovskih V.F., Kremeneckaja E.R.***
«O svjazi valovoj pervichnoj produkcii fitoplanktona s nekotorymi gidrofizicheskimi harakteristikami.[On the relation between the volume primary production of phytoplankton and some hydrophysical characteristics]. / Vodnye resursy, 2000. T.27. № 4. p. 445-448.
3. ***Dubovskaja O.P.***
Metodologicheskie osnovy ispol'zovanija sedimentacionnyh lovushek v morskih i kontinental'nyh vodojomah (obzor).[Methodological basics for using sediment traps in maritime and inland bodies (overview)]. // Gidrobiol. zhurn., 2002. T. 38. № 5. p. 98–110.
4. ***Kompleksnye issledovanija vodohranilishh.***
[Complex exploration of water bodies.]M.: Izd-vo MGU, 1979. Vyp. 3: Mozhajskoe vodohranilishhe. 400 p.
5. ***Kremeneckaja E.R., Perekal'skij V.M., Lomova D.V.***
O roli vzmuchivanija donnyh otlozhenij v balanse vzveshennogo veshhestva v Mozhajskom vodohranilishhe v letnij period. [On the role of disturbance of bed deposits in the balance of suspended material in Mozhaisk reservoir in summer]. // Voda: himija i jekologija, 2013. № 2. p. 12-18.
6. ***Lomova D.V., Kremeneckaja E.R., Isupova M.V.***
Formirovanie sedimentacionnyh potokov v dolinnom vodohranilishhe // Sovremennye problemy vodohranilishha i ih vodosborov (Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konf.). Perm': PGU, 2011 g.t.1. p. 105-109.
7. ***Martynova M.V.***
Donnye otlozhenija kak sostavljajushhaja limnicheskih jekosistem. M.: Nauka, 2010.[Bed deposits as a constituent part of limnic reservoirs]. 243 p.
8. ***Perekal'skij V.M., Kremeneckaja E.R.***
Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskogo i kislorodnogo rezhimov vodoemov. [Mathematic modeling of thermohydrodynamic and oxygen regimes of water bodies]. // Meteorologija i gidrologija, 2007. № 6. p. 60-72.
9. ***Sadchikov A.P.***
Transformacija organicheskogo veshhestva bakterial'nym soobshhestvom v vodoemah raznoj trofnosti. [Transformation of organic substance by a bacterial community in water bodies of various trophicity].// Gidrobiol. Zhurn. 2001. T.37, № 3. p. 87–92.

* *The work was financially supported by RFBR (project № 09-05-00675).*

Гидрологический режим подледникового озера Восток (Антарктида) по данным геохимических исследований ледяного керна и озерной воды*

Екайкин А.А., Козачек А.В., Липенков В.Я., Преображенская А.В., Шибаев Ю.А.

Представлены основные результаты исследования гидрологического режима подледникового озера Восток (Антарктида) по данным изучения изотопного состава керна озерного льда из глубокой скважины 5Г, а также первого образца озерной воды и моделирования. Показано, что формирование льда проходит в условиях равновесия с озерной водой, что приводит к отталкиванию газовых, минеральных, химических и микробиологических примесей. Вариации изотопного состава льда свидетельствуют о неполном смешивании талой ледниковой и резидентной озерной воды, а также о присутствии в озере гидротермальных источников. Проведенные эксперименты по моделированию замерзания воды в цилиндрической скважине позволили разработать методику анализа керна вторичного льда, образовавшегося в результате поднятия озерной воды в скважину после вскрытия озера в феврале 2012 г.

Ключевые слова: Антарктида, гидрологический режим, изотопный состав, ледяные керны, моделирование, подледниковое озеро Восток.

* *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-05-01049).*

Подледниковое озеро Восток – крупнейший объект подледной гидрологической сети Антарктиды и пятое по объему пресноводное тело нашей планеты. Последние два десятка лет оно привлекает пристальное внимание специалистов из различных областей, в первую очередь – микробиологов, поскольку вследствие изоляции от остальной части географической оболочки Земли на протяжении многих миллионов лет оно может служить местообитанием новых форм жизни, адаптированных к уникальным и суровым условиям этого водоема. В феврале 2012 г. состоялось первое вскрытие озера российскими специалистами. Исследование полученной в результате пробы озерной воды уже позволило обнаружить новые, доселе неизвестные виды бактерий, возможно, являющиеся частью озерной экосистемы [4].

История открытия и исследования озера насчитывает уже около 50 лет [2]. За прошедшее с тех пор время изучению изотопного состава конжеляционного озерного льда был посвящен ряд публикаций (см. обзор в [1]). В настоящей работе мы приводим краткий обзор наиболее значимых результатов изучения изотопного состава керна озерного льда, полученных российскими специалистами за последние годы.

По сложившимся представлениям, озеро существует благодаря гидротермальному потоку тепла, за счет которого температура льда на определенной глубине достигает точки плавления. При этом в северной части озера, где толщина льда 4300 м, лед тает, а в южной части, где расположена станция Восток, при толщине ледника около 3800 м идет процесс льдообразования. В толще озерного льда выделяются два слоя: так называемый «озерный лед 1» (3537–3618 м),

ЕКАЙКИН Алексей Анатольевич кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Арктического и антарктического НИИ (ААНИИ) Росгидромета

КОЗАЧЕК Анна Владимировна младший научный сотрудник Арктического и антарктического НИИ (ААНИИ) Росгидромета

ПРЕОБРАЖЕНСКАЯ Алла Владимировна, научный сотрудник Арктического и антарктического НИИ (ААНИИ) Росгидромета

ШИБАЕВ Юрий Александрович научный сотрудник Арктического и антарктического НИИ (ААНИИ) Росгидромета

ЛИПЕНКОВ Владимир Яковлевич кандидат географических наук, заведующий лабораторией Арктического и антарктического НИИ (ААНИИ) Росгидромета

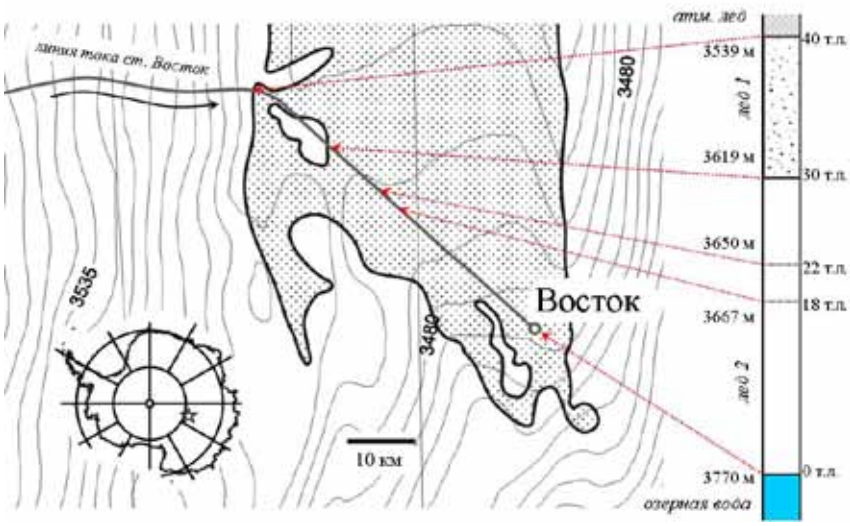


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая формирование слоев озерного льда 1 и 2 в основании ледникового покрова в районе станции Восток

содержащий видимые минеральные включения, и абсолютно чистый «озерный лед 2» (3618–3769 м). Предполагается, что лед 1 образовался в проливе, отделяющем небольшой остров от западного борта озера, а лед 2 – над глубоководной южной котловиной озера *(рис. 1)*.

Основным материалом исследования послужили образцы ледяного керна из скважин 5Г-1 и 5Г-2 в интервале глубин 3538–3769 м. Изотопный состав (концентрации дейтерия, δD, и кислорода 18, $\delta^{18}O$) керна 5Г-1 был измерен в Лаборатории наук о климате и окружающей среде (г. Жиф-сюр-Иветт, Франция), всех других упомянутых в работе образцов – в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ. Методика измерений подробно изложена в [1].

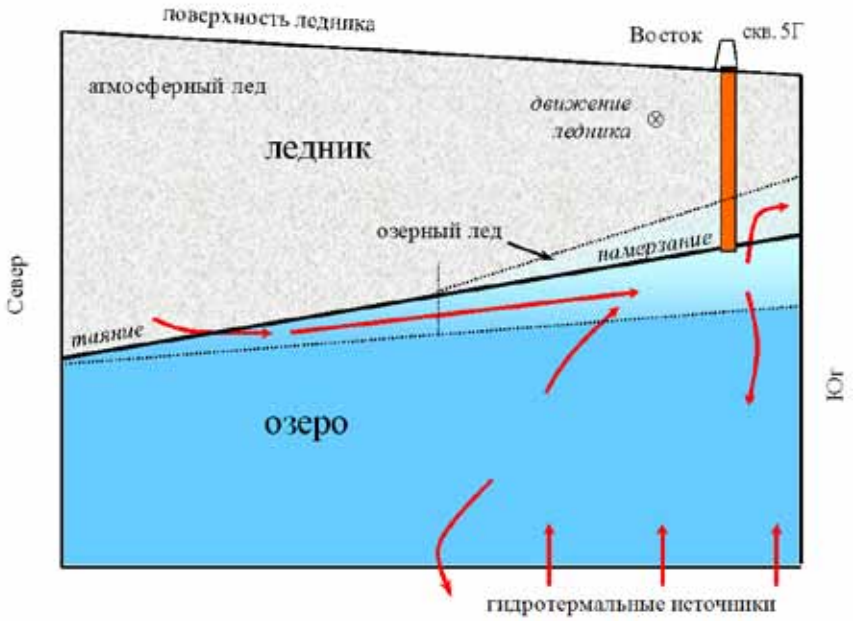


Рис. 2. Схема циркуляции воды в подледниковом озере Восток, принятая для построения простой изотопной модели

Для интерпретации изотопных данных мы использовали схему изотопного и массового баланса озера *(рис. 2)*. Талые ледниковые воды, более пресные, чем резидентная озерная вода, поднимаются вдоль наклонной нижней поверхности ледника, смешиваясь по пути с нижележащими слоями озерной воды. В южной части озера образование озерного льда сопровождается его обогащением тяжелыми изотопами по сравнению с водой, причем эффективный коэффициент фракционирования зависит от механизма образования – скорости замерзания, наличия кристаллов внутриводного льда и «водных карманов». Кроме того, в озере есть дополнительный источник воды – гидротермальный, не влияющий на массовый баланс озера (поскольку сам питается озерной водой), но изменяющий его изотопный состав. На основании данной схемы была построена простая изотопная модель озера [5]. Основной принцип, который позволил сделать заключение о природе наблюдаемых в озерном льду вариаций изотопного состава, следующий: независимо от механизма льдообразования изотопный состав озерного льда связан на диаграмме δD–$\delta^{18}O$ с изотопным составом озерной воды линией с наклоном (коэффициентом регрессии), равным 4,060±0,035. Таким образом, влияние двух основных процессов на изменчивость изотопного состава озерного льда – механизма льдообразования и вариаций изотопного состава воды озера – можно разделить с помощью параметра $dxs4 = \delta D - 4{,}06\delta^{18}O$. Изменения этого параметра в озерном льду однозначно говорят о вариациях изотопного состава озерной воды (см. пояснительную схему на *рис. 3*).

На *рис. 4, а, б* приведены данные по изотопному составу кернов скважины 5Г-1 в интервале 3540–3650 м и скважины 5Г-2 в интервале 3600–3769 м. Обращает внимание одинаковый характер изменения концентраций δD и $\delta^{18}O$ в общем

интервале (3600–3650 м) обоих кернов, что говорит о хорошем качестве измерений.

По характеру изменчивости изотопного состава вся колонка озерного льда может быть разделена на три интервала:

Интервал 3538-3619 м совпадает с толщей так называемого «озерного льда 1», сформировавшегося вблизи западного берега озера. Помимо наличия видимых минеральных включений, этот лед характеризуется относительно высоким содержанием газа [3], что свидетельствует о сложном механизме льдообразования, включающем захват и последующее замерзание водных карманов, а также образование кристаллов внутриводного льда. Поэтому главный фактор изменения изотопного состава льда в этом интервале – вариации условий и механизма льдообразования, что подтверждается наклоном линии регрессии между $\delta^{18}O$ и δD, равным 4.

Интервал 3619-3647 м образован приблизительно в 43–34 км вверх по линии тока к северо-западу от станции Восток, вблизи небольшого острова. Отсутствие корреляции между δD и $\delta^{18}O$ в этом интервале ранее было интерпретировано [5] как проявление гидротермальной активности на дне озера. Геология озера Восток изучена недостаточно, однако имеющиеся данные не исключаюцт возможности расположения в этом районе разломов земной коры, по которым и поступает гидротермальная вода.

Интервал 3647-3769 м образовался над глубоководной южной котловиной озера Восток на расстоянии 34–0 км от станции. Есть основание предполагать, что механизм льдо-образования «озерного льда 2» относительно прост и заключается в равновесном замерзании озерной воды без образования кристаллов внутриводного льда и водных карманов [3]. Изменчивость изотопного состава льда в этом интервале керна говорит о колебаниях изотопного состава озерной воды за счет пульсаций притока талой ледниковой воды. Появление этого сигнала показывает, что данный район озера более доступен для поступления талых вод из северной части озера, чем участки водоема, примыкающие к его западному берегу. Это может объясняться тем, что, согласно современным представлениям, в озере господству-

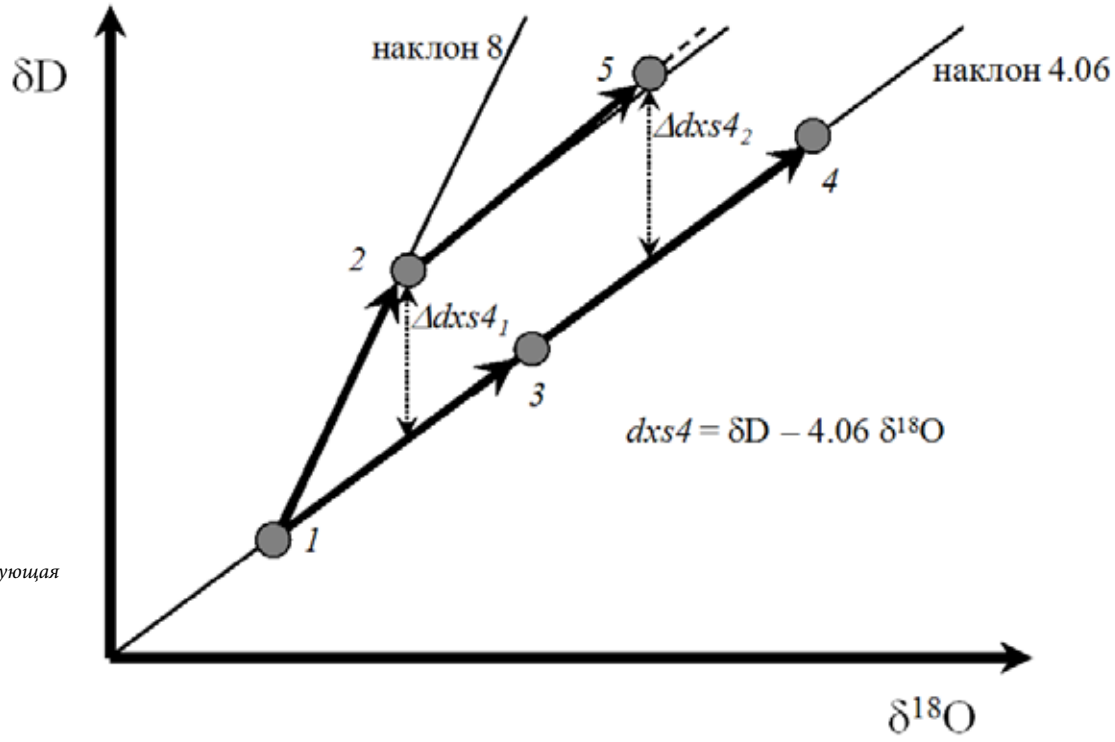


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая поведение параметра dxs4

Изотопный состав озерного льда связан с изотопным составом воды линией регрессии с наклоном 4,06. Параметр dxs4, рассчитываемый как $\delta D - 4{,}06\ \delta^{18}O$, постоянен вдоль любой линии с таким наклоном. Таким образом, значение dxs4 одинаково для воды (точка 1) и для льда, сформированного из этой воды при различных физических условиях (точки 3 и 4). Если изотопный состав воды меняется вдоль линии с наклоном, отличным от 4 (например, от точки 1 к точке 2), то параметр dxs4 изменится на величину $\delta dxs4_1$. Лед (точка 5), сформированный из такой воды (точка 2), имеет dxs4 выше, чем лед в точках 3 и 4, но почти такой же, как для воды в точке 2. При этом $\delta dxs4_1$ чуть меньше, чем $\delta dxs4_2$, поскольку наклон линии вода–лед в незначительных пределах зависит от изотопного состава воды

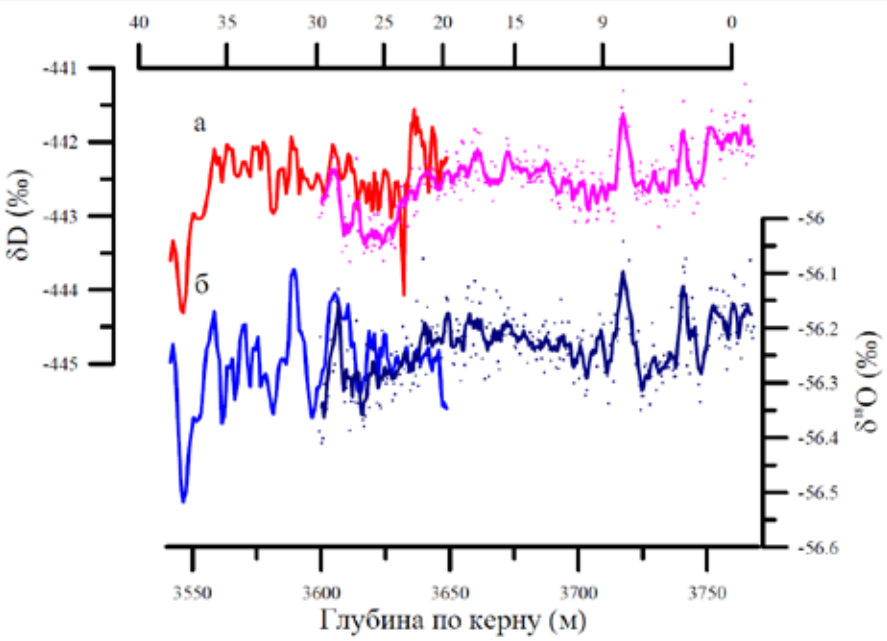


Рис. 4. *Изменение изотопного состава ледяных кернов скважин 5Г-1 и 5Г-2 в интервале глубины 3540–3769 м*
а и б – концентрации, соответственно, δD и δ18O. Представлены сглаженные кривые по пяти значениям. Точками обозначены исходные результаты измерения керна скважины 5Г-2

ет циркуляция, направленная по часовой стрелке [7]. Отметим также, что явно выраженный сигнал, связанный с талой ледниковой водой, в нижней части керна скважины 5Г-2 предполагает ее неполное смешивание с резидентной озерной водой. Это позволяет сделать важный вывод, что слой воды, располагающийся непосредственно под ледниковым покровом в районе станции Восток, не репрезентативен с точки зрения условий, существующих в более глубоких слоях озера.

Если принять гипотезу о равновесном образовании озерного льда 2, то можно точно рассчитать изотопный состав воды, из которой образовался лед этого интервала. При средних значениях изотопного состава льда, равных –56,22 ‰ для $\delta^{18}O$ и –442,4 ‰ для δD, и равновесных коэффициентах фракционирования, соответственно, 1,003 и 1,0208 [6] получаем изотопный состав воды, равный соответственно –59,04 и –453,8 ‰.

В результате вскрытия озера Восток 5 февраля 2012 г. был получен первый образец озерной воды, намерзшей на снаряд после подъема воды в скважину *(рис. 5)*. Среднее значение изотопного состава этого ледяного нароста (-453,8±1,4 ‰ для дейтерия и -59,0±0,3 ‰ для кислорода 18) точно совпало с расчетной величиной. Таким образом, изотопные данные подтверждают предположение о том, что озерный лед 2 формировался в условиях равновесия с озерной водой.

Дальнейшие исследования подледникового озера Восток будут включать несколько этапов, первым из которых было разбуривание замерзшей в скважине озерной воды в летний полевой сезон 58-й РАЭ (декабрь 2012 – февраль 2013 гг.). Анализ этих образцов позволит напрямую измерить изотопный, газовый и химический составы озерной воды, а также более достоверно определить наличие (или отсутствие) микробной жизни в ней.

Однако, вследствие того, что замерзание воды в скважине – медленный процесс, он сопровождается изотопным фракционированием, которое приводит к изменению первоначального изотопного состава в образовавшемся льду по сравнению с водой. Чтобы оценить влияние этого фактора, нами был проведен лабораторный эксперимент по моделированию процесса замерзания воды в цилиндрической скважине.

Замораживание воды производилось в пластмассовом цилиндре высотой 43 см, имеющем внутренний диаметр 110 мм и установленном в холодной (–12 … –10 °С) лаборатории на магнитной мешалке с подогревом *(рис. 6а)*. В процессе замораживания воды ее температура составляла –5,0 … –2,5 °С. Кристаллизация воды в основной части цилиндра завершилась через 74 часа после начала эксперимента, тогда как в нижней части еще оставалась жидкая вода. Исследования шлифов показали, что лед, образовавшийся в цилиндре, имеет неоднородную, радиально-лучевую структуру *(рис. 7а)* с максимальной концентрацией газовых включений вблизи оси цилиндра *(рис. 6б)*. Главные оси кристаллов лежат строго в горизонтальной плоскости и ориентированы по нормали к цилиндрической стенке сосуда, что соответствует условиям отвода тепла через нее. На *рис. 6в и 6г* показаны схема отбора изотопных проб, а также результаты их лабораторных анализов. Поперечный профиль изотопного состава искусственного керна интерпретируется следующим образом. Замерзание воды начинается вблизи стенок цилиндра и сопровождается изотопным фракционированием. Первая порция

(слой) льда находится в изотопном равновесии с водой в цилиндре и обогащена тяжелыми изотопами по сравнению с ней. В оставшейся воде концентрация тяжелых изотопов становится чуть меньше, и следующая порция льда, соответственно, также имеет чуть более низкий изотопный состав. Таким образом, чем ближе к центру искусственного керна, тем легче изотопный состав льда. Среднее значение поперечного профиля изотопного состава в керне приблизительно равно изотопному составу воды в начале эксперимента. Соответственно, незамерзшая порция влаги в конце эксперимента существенно обогащена легкими изотопами по сравнению с первоначальной водой. Наклон линии регрессии между кислородом 18 и дейтерием равен 4,3 в полном соответствии с теорией.

На *рис. 7а и б* мы сопоставили шлифы поперечных срезов модельного льда, полученного в ходе эксперимента, и льда, образовавшегося в скважине в результате замерзания озерной воды и поднятого в сезон 58 РАЭ (керн с глубины 3440 м, расстояние до озера 330 м). Оба шлифа обладают одними и теми же характерными особенностями: радиально-лучевая структура, медленный рост кристаллов от стенок скважины к центру, концентрация газов и химических примесей в центре керна, незамерзший центральный канал. Полученные данные свидетельствуют о том, что условия эксперимента достаточно точно воспроизвели условия, при которых произошло замерзание поднявшейся в скважину 5Г озерной воды в результате осуществления первого проникновения в озеро. Таким образом, результаты эксперимента будут использованы для интерпретации керна замерзшей озерной воды.

В заключение отметим, что проведенные исследования позволили существенно расширить наши представления о гидрологическом режиме подледникового озера Восток

Рис. 5. *Нарост из замерзшей озерной воды, образовавшийся на нижнем торце бурового снаряда после проникновения в подледниковое озеро Восток*

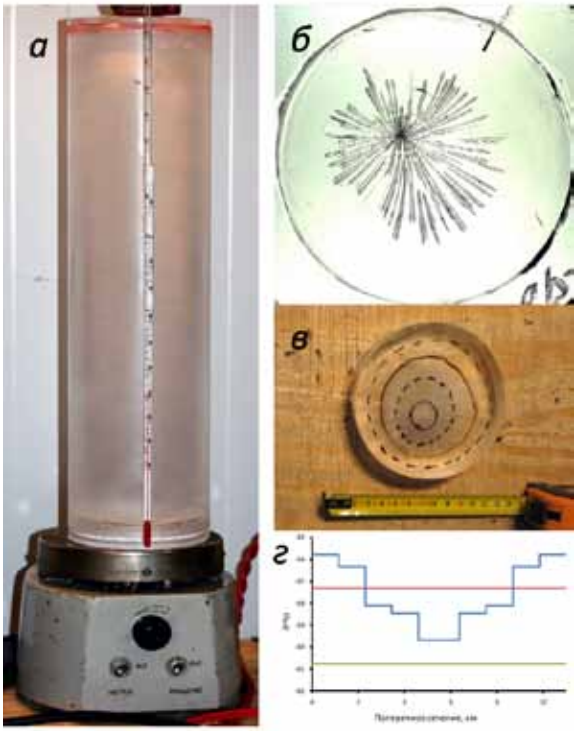


Рис. 6. *Эксперимент по моделированию льда, образующегося при замерзании воды в скважине:*
(а) – экспериментальная установка;
(б) – поперечный срез модельного льда в проходящем свете;
(в) – схема отбора изотопных проб в искусственном ледяном керне;
(г) – результаты определения изотопного состава воды до замерзания (красная линия), изотопного состава искусственного ледяного керна (синяя линия) и изотопного состава незамерзшей воды, оставшейся в нижней части цилиндра в конце эксперимента (зеленая)

еще на этапе его первичного изучения, до получения первой пробы озерной воды. Одним из важнейших является вывод о том, что поверхностный слой озерной воды в значительной степени испытывает

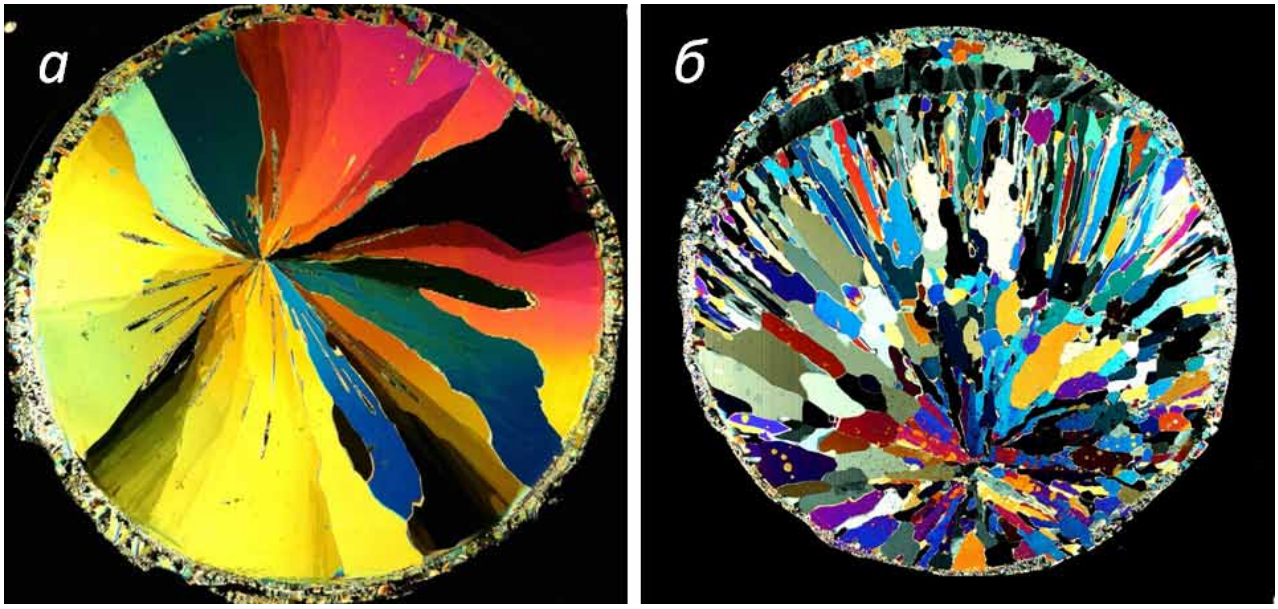


Рис. 7. Фотографии шлифов кожеляционного льда, образовавшегося в результате замерзания воды в ходе эксперимента (а) и замерзания озерной воды в скважине 5Г-1 (б), в поляризованном свете.

влияние талых ледниковых вод, поступающих из северной части озера, и потому не репрезентативен с точки зрения условий, существующих в более глубоких слоях, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований, включающих пробоотбор по всей водной толще, от нижней границы ледника до дна озера. Вместе с тем, неоднородность озера означает существование в нем различных экологических ниш, что повышает шансы на обнаружение жизни в этом уникальном водном объекте.

При написании данной статьи были использованы результаты, полученные при поддержке грантов РФФИ 05-05-65248а и 10-05-01049а.

Литература

1. ***Екайкин А.А., Липенков В.Я., Козачек А.В.***
Изотопный режим подледникового озера Восток по данным исследований глубокого ледяного керна.[Isotopic mode of the subglacial lake Vostok according to the studies of deep ice core]. – Лед и Снег. – №4 (120). – С. 78–85.
2. ***Котляков В.М.***
К истории международного проекта бурения глубокой ледниковой скважины на станции Восток. Лед и Снег. – 2012, №4 (120). – С. 5–8.
3. ***Липенков В.Я., Полякова Е.В., Екайкин А.А.***
Закономерности формирования конжеляционного льда над подледниковым озером Восток. – Лед и Снег. – 2012, №4 (120). – С 65–77.
4. ***Bulat S.***
Elusive microbial life at the uppermost water layer in subglacial Lake Vostok, East Antarctica, International Colloquium and Workshop "Ganymede Lander: scientific goals and experiments", Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia, 4–8 March 2013.
5. ***Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y., Petit J.R., Johnsen S., Jouzel J., Masson-Delmotte V.***
Insights into hydrological regime of Lake Vostok from differential behavior of deuterium and oxygen-18 in accreted ice, Journ. of Geophys. Research. – 2010. – V. 115 (C05003). – P. 1–14.
6. ***Jouzel J., Petit J.R., Souchez R.***
More than 200 m of lake ice above subglacial Lake Vostok, Antarctica. – Science. – 1999, 286. – 2138–2141.
7. ***Walsh D.***
A note on eastern boundary intensification of flow in lake Vostok, Ocean model. – 2004. – V. 4. – P.207–218.

English

Hydrological regime of subglacial lake Vostok (Antarctica) based on geochemical studies of ice core and lake water *

Alexey A. Ekaykin –
Leading research scientiste, at the Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Beringa st., St. Petersburg, 199397, Russia,
e-mail: ekaykin@aari.ru.

Anna V. Kozachek–
junior research scientist at the Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Beringa st., St. Petersburg, 199397, Russia
e-mail: kozachek@aari.ru.

Yury A. Shibayev –
research scientist at the Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Beringa st., St. Petersburg, 199397, Russia
e-mail: shibaev@aari.ru.

Alla V. Preobrazhenskaya–
Research scientist, at the Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Beringa st., St. Petersburg, 199397, Russia
e-mail: alla.preobr@aari.ru.

Vladimir Ya. Lipenkov –
Chief of the AARI Laboratory, at the Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Beringa st., St. Petersburg, 199397, Russia
e-mail: lipenkov@aari.ru.

Abstract

The main results of the subglacial Lake Vostok (Antarctica) hydrological regime investigations are presented as based on the lake ice and water isotope content studies and modeling. It is shown that the lake ice is formed in equilibrium with the water, which makes the ice to reject the gas, mineral, chemical and microbiological impurities. The variability of the stable isotopes in the lake ice is an evidence of the not complete mixing of the glacier melt and resident lake waters, as well as of the significant contribution of the hydrological sources to the lake. The experiments simulating the water freezing in a cylindrical borehole have allowed to develop the methodology of the analysis of the secondary ice formed as a result of the water rising to the borehole after the first penetration to the lake on the 5th of February 2012.

Keywords: Antarctica, hygrological regime, ice cores, isotopic composition, modeling, subglacial Lake Vostok.

References

1. ***Ekajkin A.A., Lipenkov V.Ja., Kozachek A.V.***
Izotopnyj rezhim podlednikovogo ozera Vostok po dannym issledovanij glubokogo ledjanogo kerna.[Isotope regime of sub-glacial Lake Vostok according to the exploration data on the deep ice core]. – Led i Sneg. – № 4 (120). – p. 78–85.
2. ***Kotljakov V.M.***
K istorii mezhdunarodnogo proekta burenija glubokoj lednikovoj skvazhiny na stancii Vostok [On the history of the international project on drilling a deep ice well at the station]. Led i Sneg. – 2012, №4 (120). – p. 5–8.
3. ***Lipenkov V.J., Poljakova E.V., Ekajkin A.A.***
Zakonomernosti formirovanija konzheljacionnogo l'da nad podlednikovym ozerom Vostok. [Regularities of congelation ice formation under the subglacial Lake Vostok]. – Led i Sneg. – 2012, №4 (120). – p. 65–77.
4. ***Bulat S.***
Elusive microbial life at the uppermost water layer in subglacial Lake Vostok, East Antarctica, International Colloquium and Workshop "Ganymede Lander: scientific goals and experiments", Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia, 4–8 March 2013.
5. ***Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y., Petit J.R., Johnsen S., Jouzel J., Masson-Delmotte V.***
Insights into hydrological regime of Lake Vostok from differential behavior of deuterium and oxygen-18 in accreted ice, Journ. of Geophys. Research. – 2010. – V. 115 (C05003). – p. 1–14.
6. ***Jouzel J., Petit J.R., Souchez R.***
More than 200 m of lake ice above subglacial Lake Vostok, Antarctica. – Science. – 1999, 286. – 2138–2141.
7. ***Walsh D.***
A note on eastern boundary intensification of flow in lake Vostok, Ocean model. – 2004. – V. 4. – p. 207–218.

* *The work was financially supported by RFBR (project № 10-05-01049).*

Водообеспеченность и антропогенная нагрузка на водные ресурсы России в сравнении с другими странами *

Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Бибикова Т.С., Зайцева И.С.

Показано место России по обеспеченности водными ресурсами (в основном ресурсами речного стока), антропогенной нагрузке на них, а также эффективности использования воды среди стран «большой восьмерки», 19 стран, репрезентативных для суждения о мировом водном хозяйстве, и мира в целом.

Ключевые слова: водные ресурсы, речной сток, антропогенная нагрузка, использование воды, эффективность.

* *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-00838).*

Нередко принято сравнивать Россию и СССР с другими странами мира по природным условиям и хозяйственной деятельности. Не являются исключением и сравнения по водным ресурсам и водохозяйственной деятельности, что нашло отражение в целом ряде публикаций [1–19]. Однако эта тема далеко не исчерпана, ряд положений и данных нуждается в корректировке и дополнении, особенно с учетом появившейся в последнее время информации.

В данной работе выполнено сравнение России и других стран по обеспеченности водными ресурсами, антропогенной нагрузке на них, эффективности использования воды. Основное сравнение сделано с общемировыми показателями, с показателями так называемой «большой восьмерки» (помимо России, Великобритания, Германия, Италия, Канада, США, Франция, Япония). Кроме того, показано место России среди 19 стран (репрезентативных для суждения о мировом водном хозяйстве). В число последних вошли крупнейшие развивающиеся государства (Индия, Китай, Бразилия, Нигерия), бывшие республики СССР (Белоруссия, Украина, Казахстан, Узбекистан), бывшие соцстраны Восточной Европы (Польша, Болгария), а также Австралия. О репрезентативности этих стран свидетельствует общая, близкая к мировой, структура водного хозяйства, а также довольно постоянное соотношение их суммарного водопотребления и мирового на уровне 1990 и 2000 гг. (примерно 60%), что дало основание по данным этих стран за 2010 г. рассчитать мировое водопотребление за этот год, по которому мы не располагаем данными. Добавим еще, что отобранные 19 стран (включая Россию) представляют все континенты, кроме Антарктиды, занимают 54% суши земного шара и сосредоточивают 56% мирового населения. Соответственно на долю России приходится около 13% суши и 2% населения. Сведения о площади государств и численности населения взяты из [20].

Обеспеченность водными ресурсами

В числе показателей, выбранных для сравнения, в первую очередь, ресурсы речного стока, но также ресурсы атмосферных осадков (как их потен-

КОРОНКЕВИЧ
Николай Иванович
доктор географических наук, профессор,
Заведующий лабораторией гидрологии Федерального государственного учреждения науки Института географии РАН.

БАРАБАНОВА
Елена Алексеевна
кандидат географических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института географии Российской академии наук.

БИБИКОВА
Татьяна Сергеевна
кандидат географических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института географии Российской академии наук.

ЗАЙЦЕВА
Ирина Сергеевна
кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института географии Российской академии наук.

циального источника) и почвенной влаги, показателем которых ориентировочно может служить величина годового испарения. Особую ценность для водного хозяйства представляют ресурсы устойчивого во времени и не требующего регулирования подземного стока. Помимо объемных показателей (км^3/год) использованы и удельные (количество водных ресурсов на единицу площади и населения).

При оценке обеспеченности стран мира водными ресурсами были использованы данные М.И. Львовича [16], скорректированные по последним данным Государственного гидрологического института (ГГИ), представленным в монографии [5]. Результаты расчетов представлены в *табл. 1*.

Несложные расчеты показывают (*табл. 1, 2*), что доля стран «большой восьмерки» в общих мировых значениях осадков, стока и испарения составляет от 1/5 до 1/4, что ниже их доли в площади (29%). Отметим, что решающий вклад в величину показателей «большой восьмерки» вносят Россия, США и Канада. На долю 19 стран приходится примерно половина мировых ресурсов воды, на долю России – от 32 до 46% абсолютных значений (км^3/год) элементов водного баланса «большой восьмерки», от 14 до 18% 19 стран и от 6,8 до 9,5 % водных ресурсов мира.

Как видно из *табл. 2*, доля России в абсолютных показателях (в км^3) существенно возрастает, а в отношении слоя осадков, стока и испарения, выраженных в мм, падает. Дело в том, что по удельной обеспеченности территории (в мм слоя) Россия уступает средним мировым показателям и показателям многих стран, в т.ч. всех стран «большой восьмерки». Особенно велико отставание по величине наиболее ценного для водного хозяйства подземного стока – почти в 1,8 раза по сравнению со средними мировыми значениями. Если вычесть Россию из этих общих показателей, то отставание будет еще больше (см. *табл. 2*). Наше богатство водными ресурсами в абсолютном исчислении (в км^3) – следствие главным образом большой территории. Гораздо лучше позиции России по водообеспеченности населения, особенно полным речным стоком (практически в 5 раз по сравнению с миром в целом), что является следствием относительно невысокой в целом заселенности территории и высокого уровня половодий, в основном формирующих величину годового стока. Водообеспеченность населения России подземным стоком также превышает среднемировой показатель примерно в три с половиной раза. Отметим, что большая часть выбранных для сравнения стран располагает ресурсами устойчивого подземного стока, меньшими 1,5 тыс. м^3/чел в год, т.е. величины, характеризующей, по данным ЮНЕСКО, недостаточность водообеспечения. Отсюда острая необходимость во многих случаях экономии воды и гидротехниче-

Таблица 1. *Обеспеченность водными ресурсами территории и населения*

Показатели	РФ	Страны «большой восьмерки»	19 стран	Мир
Площадь, тыс. км^2	17098	38436	72886	135000
Население, млн чел	139	883	3933	7000
Осадки, км^3	9080	22233	55703	116775
Полный речной сток, км^3	4053	11278	22520	42780
Подземный сток, км^3	882	2722	6186	12285
Испарение, км^3	5027	10955	33183	73995
Осадки, мм	531	578	764	865
Полный речной сток, мм	237	293	309	317
Подземный сток, мм	52	71	85	91
Испарение, мм	294	285	455	548
Осадки, тыс. м^3/чел	65	25	14	17
Обеспеченность полным речным стоком, тыс.м^3/чел	29	13	5,7	6,1
Обеспеченность подземным стоком, тыс.м^3/чел	6,4	3,1	1,6	1,8

Таблица 2. *Процентные соотношения по водообеспеченности*

Показатели	Процент «большой восьмерки» от мировых показателей	Процент 19 стран от мировых показателей	Процент РФ от показателей*		
			стран «большой восьмерки»	19 стран	мира в целом
Площадь, тыс. км^2	29	54	45/80	24/31	13/15
Население, млн чел	13	56	16/19	3,5/3,7	2,0/2,0
Осадки, км^3	19	48	41/69	16/20	7,8/8,4
Полный речной сток, км3	26	53	36/56	18/22	9,5/11
Подземный сток, км^3	22	50	32/48	14/17	7,2/7,7
Испарение, км^3	15	45	46/85	15/18	6,8/7,3
Осадки, мм	67	88	92/86	70/64	61/58
Полный речной сток, мм	93	98	81/70	77/72	75/72
Подземный сток, мм	78	93	18/60	61/55	57/54
Испарение, мм	52	83	104/106	65/58	54/50
Обеспеченность осадками, тыс. м^3/чел	151	85	260/370	462/533	392/417
Обеспеченность полным речным стоком, тыс.м^3/чел	209	94	229/301	510/600	478/518
Обеспеченность подземным стоком, тыс.м^3/чел	176	90	206/257	404/455	362/383

** в числителе – с учетом вхождения РФ в рассматриваемые группировки стран, в знаменателе – без РФ*

ского регулирования стока. Уместно заметить, что средние цифры для каждой страны и тем более для мира, складываются из подчас весьма контрастных значений водообеспеченности составляющих их районов. Отметим также, что большая часть населения России проживает в районах, удельная природная обеспеченность которых водой значительно уступает среднероссийским показателям.

Антропогенная нагрузка на водные ресурсы

Россия принадлежит к группе стран с наименьшей в целом населенческой нагрузкой на водные ресурсы. Нагрузка на полный речной сток в России почти в пять раз меньше общемировой и в 3,5 раза меньше нагрузки на подземный сток. Еще больше разница в пользу России, если сравнивать ее с остальным миром (*табл. 3* и *4*).

Значительную нагрузку на водные ресурсы оказывают различные виды хозяйственной деятельности на водосборах (разнообразная сельскохозяйственная деятельность, лесное хозяйство, урбанизация территории и др.), но оценка такой нагрузки требует дополнительных исследований и здесь не учитывается. Ниже основное внимание уделено непосредственным воздействиям на речной сток – созданию водохранилищ и водозабору, а также сбросу в реки и водоемы сточных и возвратных вод.

К сожалению, мы не располагаем данными о водохранилищах по большинству стран за самые последние годы, но на начало XXI в. в мире насчитывалось более 60 тыс. искусственных водоемов, а количество водохранилищ емкостью более 100 млн м^3 приближалось к 3 тыс. [2] и почти треть таких водохранилищ расположена в России и США.

Водохранилища – мощное средство целенаправленного воздействия на водные ресурсы, ведущее к увеличению устойчивого стока за счет паводочного и вместе с тем способствующее уменьшению годового стока за счет, главным образом, дополнительного испарения с их акватории. Сведения о водохранилищах в основном почерпнуты из [5].

Менее всего освещена величина потерь воды на дополнительное испарение. Для тех стран, по которым отсутствовали эти данные, они определялись умножением площади водохранилищ на дефицит испарения по Л.И. Зубенок [21].

В России водохранилища дают возможность увеличить ресурсы естественного устойчивого стока почти в 1,5 раза, что выше среднемирового показателя (1,3).

Россия среди других стран мира располагает наибольшим полным объемом водохранилищ. На Россию, занимающую по площади 13% территории суши, приходится 16% площади всех водохранилищ мира. Затопление земель при их создании в среднем в 1,2–1,3 раза превысило общемировые показатели. Если сравнить удельные показатели, т.е. площадь затопления, приходящуюся на 1 км^3 полного и полезного объемов водохранилищ, то по России они таковы – около 60 и 138 км^2. Для мира в целом это 56 и 90 км^2, для стран «большой восьмерки» – 61 и 90, для Канады – 74 и 102, США – 50 и 55 км^2. То есть, регулирование стока в России сопряжено в целом с достаточно большими земельными издержками, поскольку большинство наших водохранилищ создано, в отличие от многих других стран, на равнине.

В *табл. 3* представлена и величина водозабора и связанных с ним безвозвратных изъятий воды на уровне 2010 г. Данные по водозабору для России, стран «большой восьмерки» и 19 выбранных государств почерпнуты из [4, 22, 23], а для всего мира рассчитаны на основании соотношения водозабора этих стран и мира за более ранние годы. Доля безвозвратных изъ-

Таблица 3. *Антропогенная нагрузка на водные ресурсы*

Показатели	РФ	Страны «большой восьмерки»*	19 стран*	Мир*
Населенческая нагрузка на полный речной сток, млн чел/км^3	0,03	0,08/0,10	0,17/0,21	0,16/0,18
Населенческая нагрузка на подземный сток, млн чел/км^3	0,16	0,32/0,40	0,64/0,72	0,57/0,60
Полный объем водохранилищ, км^3	960	2613/1653	4092/3132	6368/5408
Полезный объем водохранилищ, км^3	416	1759/1343	2629/2213	3952/3536
Площадь водохранилищ, тыс. км^2	57	159/101	241/184	356/229
Потери воды на дополнительное испарение с поверхности водохранилищ, км^3	10	41/31	103/93	170/160
Устойчивый сток, км^3	1298	4481/3183	8814/7516	16237/14939
Водозабор, км^3	66	803/737	2320/2254	3860/3794
Общий безвозвратный расход с учетом потерь воды на дополнительное испарение с поверхности водохранилищ, км^3	26	262/237	1241/1216	2240/2214
Безвозвратный расход в % от остаточного полного речного стока	0,6	2,4/3,4	5,8/7,0	5,5/6,1
Безвозвратный расход в % от остаточного устойчивого речного стока	2,0	6,2/8,1	16/19	16/17
Объем сточных вод, км^3	53	670/617	1236/1182	1790/1737
Кратность разбавления сточных вод остаточным полным речным стоком	76	16/11	17/15	23/21
Кратность разбавления сточных вод остаточным устойчивым стоком	24	6,3/4,8	6,1/5,3	7,8/7,3

** в числителе – с учетом вхождения РФ в рассматриваемые группировки стран, в знаменателе – без РФ*

Таблица 4. *Процентные соотношения по антропогенной нагрузке*

Показатели	Процент «большой восьмерки» от мировых показателей	Процент 19 стран от мировых показателей	Процент РФ от показателей*		
			стран «большой восьмерки»	19 стран	мира в целом
Населенческая нагрузка на полный речной сток, млн чел/км^3	48	107	44/33	20/17	21/19
Населенческая нагрузка на подземный сток, млн чел/км^3	57	112	49/39	25/22	28/26
Полный объем водохранилищ, км3	41	64	37/58	24/31	15/18
Полезный объем водохранилищ, км^3	45	67	24/31	16/19	10/12
Площадь водохранилищ, км^2	45	68	36/56	24/31	16/19
Потери воды на дополнительное испарение с поверхности водохранилищ, км^3	24	61	25/33	10/11	6,1/6,4
Устойчивый сток, км^3	28	54	29/41	15/17	8,0/8,7
Водозабор, км^3	21	60	8,2/9,0	2,9/2,9	1,7/1,7
Общий безвозвратный расход, км^3	12	55	9,8/10	2,1/2,1	1,1/1,2
Объем сточных вод, км^3	37	69	8,0/8,6	4,3/4,5	3,0/3,1

** в числителе – с учетом вхождения РФ в рассматриваемые группировки стран, в знаменателе – без РФ*

ятий рассчитана на основе структуры использования воды [5, 17] и доли безвозвратного расхода в водопотреблении различных отраслей хозяйства по данным, частично содержащимся в [5], частично полученным, исходя из следующих зональных пропорций: сельскохозяйственные нужды, включая орошение, 55–80% водозабора, коммунально-бытовой сектор 10–30%, промышленность 4–15%.

Структура использования воды на начало XXI в. представлена на *рис. 1*. Обратим внимание на повышенную по сравнению с другими странами долю воды, расходуемую в России на коммунально-бытовое водоснабжение, относительно низкий процент расходов воды на нужды сельского хозяйства, что отчасти объясняется сравнительно небольшим развитием орошаемого земледелия, а также малыми значениями дефицита влажности воздуха в районах, где имеет место поливное земледелие. Сказываются и кризисные явления в сельском хозяйстве, остро проявившиеся после распада СССР и частично вызвавшиеся в отсутствии у хозяйств средств на полив земель.

Близость структуры использования воды в выбранных 19 странах к общемировой и отмеченное выше относительное постоянство доли водозабора 19 стран в мировом водозаборе на уровне 1990 и 2000 гг. (примерно 60%) позволяет предположить, что данное соотношение сохранилось и на уровне 2010 г. Таким образом, поскольку мы располагали сведениями о водозаборе в этих 19 странах на уровне 2010 г., а данные по общему мировому водопотреблению отсутствовали, величина мирового водопотребления, представленная в *табл. 3* (3860 км^3/ год, а с учетом потерь на испарение с водохранилищ 4030 км^3), рассчитана

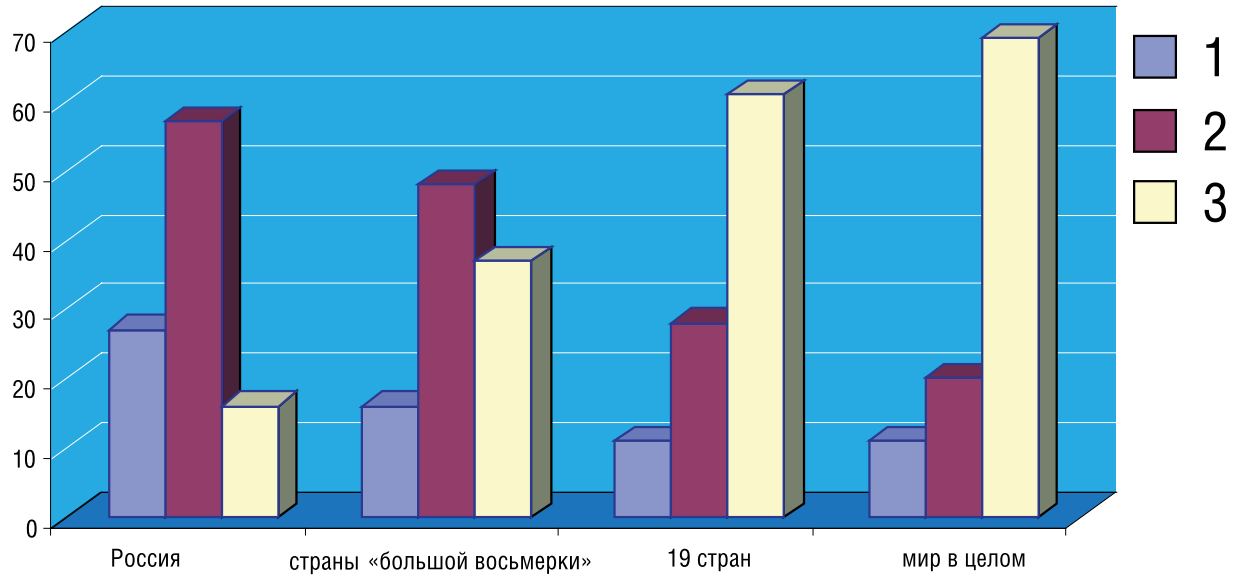


Рис. 1. *Структура использования воды, %.*
1 – коммунально-бытовое, 2 – промышленное, 3 – сельскохозяйственное

исходя из предположения о сохранении указанного соотношения и структуры водопотребления.

Как по водозабору, так и величине безвозвратного расхода (связанного с водозабором и общего – с учетом дополнительных потерь на испарение с акватории водохранилищ) Россия занимает весьма скромные позиции в мировом водохозяйственном комплексе. Это объясняется относительно «северным расположением» России и невысокой долей орошаемого земледелия – главного мирового водопотребителя. Ведущие страны по размерам водозабора и безвозвратных изъятий воды: Индия, Китай, США – это страны с большими площадями орошаемого земледелия. В Узбекистане водозабор и безвозвратный расход значительно превышают величину остающихся после использования местных водных ресурсов (остаточного стока), и образующийся дефицит покрывается за счет притока транзитных вод с территории соседних государств.

Значительную во многих случаях часть остаточного стока (после вычета безвозвратных изъятий) составляют сточные воды, включая коллекторно-дренажные воды, возвращающиеся с орошаемых земель. Как известно, сточные воды – главный источник загрязнения водных объектов. Даже после очистки часть ингредиентов остается и загрязняет реки и водоемы. Для суждения об их воздействии на качество вод применен относительно простой прием – определение кратности разбавления сточных вод остаточным после безвозвратных изъятий стоком. Чем она ниже, тем больше вероятность загрязнения водных объектов. Как следует из расчетов, по кратности разбавления сточных вод полным речным стоком Россия (76) уступает лишь Бразилии (206). По этому показателю ситуация у нас почти в 10 раз лучше, чем в США и в 3 раза лучше, чем в мире в целом. Несколько хуже ситуация с разбавлением сточных вод остаточным устойчивым стоком. Но в целом по стране ситуация выглядит относительно благополучной в сравнении с большинством стран мира, хотя, очевидно, в наиболее обжитых районах России положение с загрязнением воды гораздо менее оптимистично.

Динамика водопотребления

На *рис. 2* приведены данные по водопотреблению (без расхода воды на дополнительное испарение с акватории водохранилищ) за 1990 и 2010 гг. Можно видеть неоднозначную ситуацию. Водозабор 19 стран и мира в целом возрос за 20-летие примерно на 10 %, а у стран «большой восьмерки» произошло снижение водозабора на 70 км^3/год, или на 8%. При определенной стабильности у большинства членов этого сообщества главной причиной такого снижения стало уменьшение водозабора в России (на 50 км^3/год, или более чем в 1,7 раза), что явилось следствием кризис-

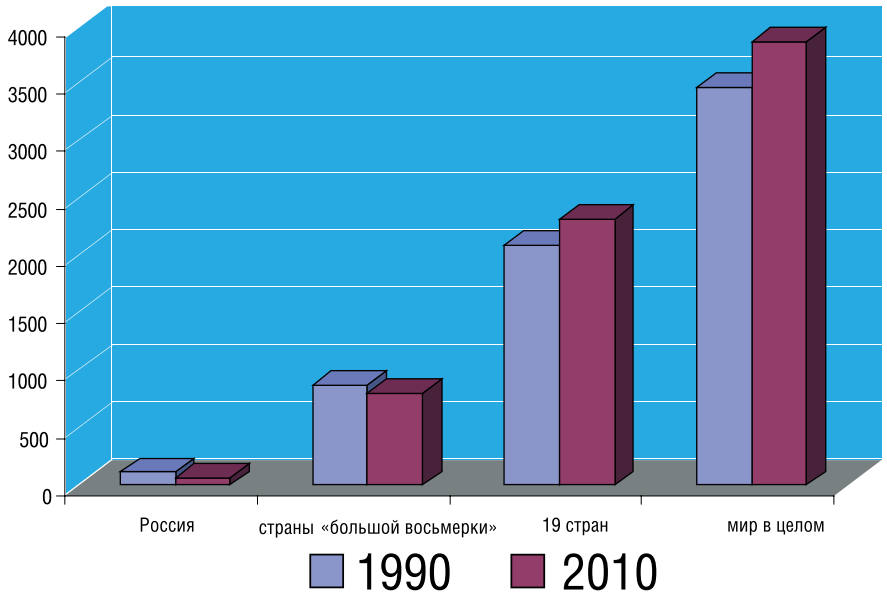


Рис. 2. Динамика водопотребления, км³

ных явлений после распада СССР и перестройки хозяйства в сторону менее водоемких отраслей. Аналогична тенденция и у других бывших республик СССР, а также бывших соцстран. Напротив, Китай, Индия, Бразилия, Нигерия, ряд других развивающихся стран характеризуются приростом водозабора, обеспечивающим общее его увеличение и в мире в целом.

Эффективность водопотребления

Одним из наиболее распространенных способов определения общей эффективности водопотребления считается соотношение ВВП, в данном случае получаемого из [24, 25], и количества затраченной страной воды. Из рис. 3 видно, что для производства 1 млрд долл. ВВП Россия на уровне 2010 г. расходовала большее количество воды, чем в среднем страны «большой восьмерки», но меньше, чем 19 стран и мир в целом. Или, если считать несколько по иному, получала меньшую отдачу в ВВП на единицу расходуемой воды по сравнению со странами «большой восьмерки» и большую, чем 19 стран и мир в целом. Расчеты показывают, что эффективность использования воды в большинстве бывших республик СССР меньше, чем в России. Также малоэффективно использование воды в Индии и Китае. Получаемая картина помимо объективных причин, связанных с несовершенством водохозяйственного комплекса, объясняется и особенностями структуры водопотребления, а именно ведущей ролью водоемкого орошаемого земледелия, дающего денежную отдачу гораздо меньшую, чем промышленность.

Отметим и несовершенство подобного расчета эффективности использования воды, особенно в финансовой части используемого показателя.

Так, если считать по паритету покупательной способности (ППС), то эффективность использования воды в России оказывается выше в полтора раза по сравнению с расчетом по ВВП.

Есть и более конкретные показатели эффективности водопотребления, такие, например, как количество используемой воды в расчете на одного жителя, на гектар орошаемой площади. На хозяйственно-бытовые нужды в расчете на душу населения в России используется воды в 1,6 раза больше, чем в мире в целом, почти в 1,5 раза больше чем в Германии, но в 2 с лишним раза меньше, чем в США. Ввиду особенностей природных условий, состава орошаемых культур, указанных выше финансовых трудностей, удельный забор воды на орошение (на 1 га) в России в 4 с лишним раза ниже среднего мирового и почти в 10 раз ниже, чем в Японии, где преобладает орошение такой водоемкой культуры, как рис.

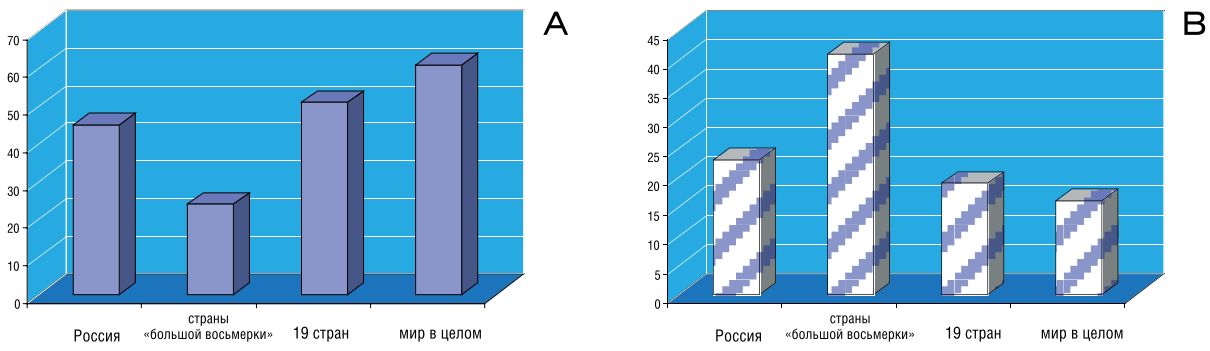


Рис. 3. Эффективность водопотребления на уровне 2010 г.
А – затраты воды на 1 млрд $ ВВП, млн м³/млрд $ ВВП; В – экономическая отдача, млрд $ ВВП/км³

Основные выводы

1. Россия занимает второе место в мире после Бразилии по общему объему ресурсов полного речного стока. Обеспеченность населения России ресурсами полного речного стока в 2,2 раза превышает среднюю обеспеченность стран «большой восьмерки» и почти в пять раз 19 выбранных стран и мира в целом. А без учета России в составе данных группировок стран это соотношение еще больше. Вместе с тем, удельная обеспеченность территории России (слой полного речного стока) соответственно в 1,2, 1,3 и почти в 1,4 раза ниже. Еще ниже удельная обеспеченность территории РФ ресурсами подземного стока – почти в 1,4 раза по сравнению со странами «большой восьмерки» и почти в 1,7 и 1,8 раза 19 стран и мира в целом, хотя в расчете на душу населения обеспеченность РФ остается более высокой, чем в рассматриваемых странах.
2. Населенческая нагрузка на полный речной сток России почти в три раза ниже, чем в среднем в странах «большой восьмерки», и в пять с лишним раз ниже по сравнению с 19 странами и миром в целом. Населенческая нагрузка на подземный сток ниже соответственно в два и четыре раза.
3. Создание водохранилищ в России привело к увеличению потенциально устойчивого стока почти в полтора раза. Это больше, чем в 19 странах и в мире в целом (1,3 раза). При этом удельное затопление территории в России (в расчете на 1 км^3 полезного объема водохранилищ) в полтора раза выше, чем в среднем в странах «большой восьмерки», в 19 странах и в мире в целом, однако потери воды на дополнительное испарение с акватории российских водохранилищ составляют всего около 6 % от аналогичного мирового показателя, тогда как их акватория равна 16 % площади всех водохранилищ мира.
4. Россия характеризуется относительно низкими значениями водозабора и особенно безвозвратных изъятий. Водозабор на уровне 2010 г. составлял лишь 1,4% ресурсов полного речного стока и 13% подземного. Тогда как для стран «большой восьмерки» соответствующие цифры составляют 7 и 24%, для 19 стран – 10 и 37%, а для мира в целом – 9 и 34%. Общий безвозвратный расход в России составляет лишь 0,3 % остаточного (после вычета безвозвратных изъятий) полного речного стока и 0,8 % остаточного устойчивого стока. Для стран «большой восьмерки» доля безвозвратного расхода, соответственно, 2,4 и 6,2%, а 19 стран и мира в целом – около 6 и 16%.
5. Кратность разбавления образующихся сточных вод остаточным речным стоком (76 раз полным речным стоком и 24 устойчивым) – одна из самых больших в мире наряду с Канадой, хотя и почти в три раза ниже, чем в Бразилии. Кратность разбавления сточных вод в 19 странах в четыре раза, а в мире в целом в три раза ниже, чем в России.
6. По сравнению с 1990 г. водозабор в России снизился более чем в 1,7 раза при том, что у стран «большой восьмерки» эти снижение составило 8% (в основном за счет России), а в 19 странах и в мире в целом водозабор возрос примерно на 10%.
7. Сопоставление затрат воды и величины ВВП показывает, что эффективность использования водных ресурсов России на уровне 2010 г. по этому показателю почти в два раза ниже, чем в среднем для всех стран «большой восьмерки», но выше показателей 19 стран и мира в целом.
8. На хозяйственно-бытовые нужды на душу населения в России используется воды в 1,6 раза больше, чем в мире в целом. В то же время удельные затраты воды на орошение (на 1 га) у нас в стране в четыре с лишним раза ниже среднемировых.

Литература

1. ***Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия.*** – Москва. – Наука. – 2003. – 367 с.
2. ***Барабанова Е.А.*** Глобально-региональные особенности регулирования стока рек под влиянием водохранилищ (по косвенным данным) // Вопросы географии. – Сб. 133: Географо-гидрологические исследования. – М., Издательский дом «Кодекс». – 2012. – С. 297–311.
3. ***Бибикова Т.С.*** Динамика водопотребления в России, Украине и Белоруссии в постсоветский период // Вопросы географии. – Сб. 133: Географо-гидрологические исследования. – М., Издательский дом «Кодекс». – 2012. – С. 274–288.
4. ***Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2010 году.*** – Статистический сборник (под ред. Н.Г. Рыбальского и А.Д. Думнова). – М., НИА Природа. – 2011. – 272 с.
5. ***Водные ресурсы и их использование.*** – СПб, Государственный гидрологический институт. – 2008. – 600 с.
6. ***Водный баланс и водные ресурсы Земли.*** – Л., Гидрометеоиздат. – 1974. – 639 с.
7. ***Глазовский Н.Ф.*** Глобальные закономерности распределения ресурсоемкости экономики // Изв. РАН. – Сер. Геогр. – 1992, № 3. – С. 12–22.
8. ***Глазовский Н.Ф.*** Эффективность использования природных ресурсов и возможные пороги развития // Проблемы природопользования и экономическая ситуация в Европейской России и сопредельных государствах. Белгород: 2004. – С. 9–15.
9. ***Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С.*** Потребление воды: экологические, экономические, социальные и политические аспекты. – М.: Наука. – 2006. – 221 с.
10. ***Демин А.П.*** Современная водоемкость экономик стран мира // Изв. РАН, сер. географ. – 2012, № 5.
11. ***Демин А.П.*** Экономические проблемы водопользования // Экономические и территориальные аспекты управления водохозяйственным комплексом России. – М., РАСХН, 2013. – С. 240–273
12. ***Думнов А.Д.*** Международные сопоставления водопользования: некоторые итоги // Природно-ресурсные ведомости. – 2011, № 5. – С. 4.
13. ***Зайцева И.С.*** Антропогенные воздействия на водные ресурсы стран «большой восьмерки» // Вопросы географии. – Сб. 133: – Географо-гидрологические исследования. – М., Издательский дом «Кодекс». – 2012. – С. 266–273.
14. ***Клюев Н.Н.*** Россия на экологической карте мира // Вестник Российской Академии наук. – Т.72, № 8. – 2002. – С.698–705.
15. ***Коронкевич Н.И.*** Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. – М., Наука. – 1990. – 205 с.
16. ***Львович М.И.*** Мировые водные ресурсы и их будущее. – М., Мысль. – 1974. – 448 с.
17. ***Россия и страны мира.*** – 2008. – М.: Ростат. – 2008. – 361 с.
18. ***Шикломанов И.А.*** Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1989. – 334 с.
19. ***Экстремальные гидрологические ситуации.*** – М., Медиа-ПРЕСС. – 2010. – 464 с.
20. ***Статистика стран мира.*** Экономика, численность населения, государственное устройство стран мира// http://iformatsiya.ru/.
21. ***Зубенок Л.И.*** Испарение на континентах. – Л., Гидрометеоиздат. – 1976. – 264 с.
22. ***Интернет-ресурсы:*** http://www.mnr.gov.ru, http://www.oecdilibrary.org, http://epp.eurostat.ec.europa.eu, http://www.fao.org, http://www.minpriroda.by, http://www.menr.gov.ua, http://www.ausstats.abs.gov.au, http://www.ec.gc.ca.
23. ***Les prélèvements d'eau en France en 2009 et leurs évolutions depuis dix ans // Chiffres & Statistiques.*** – N290, Février. –2012.
24. ***Nominal 2012 GDP for the world and the European Union (EU).*** World Economic Outlook Database, October 2012. – International Monetary Fund. – Retrieved 2012–12–31.
25. ***Report for Selected Countries and Subject.*** World Economic Outlook Database, October 2012. – International Monetary Fund. Retrieved February 1, 2013.

English

Water supply and anthropogenic load on water resources of Russia in comparison with other countries *

Nikolay I. Koronkevich –
Doctor of Geographical Sciences, Professor, the Chief of the laboratory, Institute of Geography RAS,
29, Staromonetniy pereulok Moscow, 119017, Russia,
e-mail: hydro-igras@yandex.ru.

Tatyana S. Bibikova –
Candidate of Geographical Sciences, research scientist at the Institute of Geography RAS,
29, Staromonetniy pereulok Moscow, 119017, Russia,
e-mail: bibikova-t@yandex.ru.

Yelena A. Barabanova –
Candidate of Geographical Sciences, senior research scientist at the Institute of Geography RAS,
29, Staromonetniy pereulok Moscow, 119017, Russia,
e-mail: barea@inbox.ru.

Irina S. Zaytseva –
Candidate of Geographical Sciences, leading research scientist at the Institute of Geography RAS,
29, Staromonetniy pereulok Moscow, 119017, Russia,
e-mail: zirinas@mail.ru.

* *The work was financially supported by RFBR (project № 12-05-00838).*

Abstract

The position of Russia by water supply (mainly resources of river flow), anthropogenic pressure on them and by the water use is shown on the background of the G8, 19 countries, representative for the judgments of the global water industry, and the world at large.

Keywords: Water resources, river flow, anthropogenic load, water use, effectiveness.

References

1. ***Antropogennye vozdejstvija na vodnye resursy Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v konce XX stoletija.***
[Anthropogenic impact on the water resources of Russia and the neighboring states at the end of the 20th century. Anthropogenic impact on the water resources of Russia and the neighboring states at the end of the 20th century.] Moskva. – Nauka. – 2003. – 367 p.
2. ***Barabanova E.A.***
Global'no-regional'nye osobennosti regulirovanija stoka rek pod vlijaniem vodohranilishh (po kosvennym dannym) [Global and regional peculiarities of river runoff regulation influenced by water reservoirs (according indirect data).// Voprosy geografii. – Sb. 133: Geografo-gidrologicheskie issledovanija. – M., Izdatel'skij dom «Kodeks». – 2012. – p. 297–311.
3. ***Bibikova T.S.***
Dinamika vodopotreblenija v Rossii, Ukraine i Belorussii v postsovetskij period [Dynamics of water consumption in Russia, Ukraine and Belarus in the post-Soviet era].// Voprosy geografii. – Sb. 133: Geografo-gidrologicheskie issledovanija. – M., Izdatel'skij dom «Kodeks». – 2012. – p. 274–288.
4. ***Vodnye resursy i vodnoe hozjajstvo Rossii v 2010 godu.***
[Water resources and water economy in 2010.]– Statisticheskij sbornik (pod red. N.G. Rybal'skogo i A.D. Dumnova). – M., NIA Priroda. – 2011. – 272 p.
5. ***Vodnye resursy i ih ispol'zovanie.***
[Water resources and their use].- SPb, Gosudarstvennyj gidrologicheskij institut. – 2008. – 600 p.
6. ***Vodnyj balans i vodnye resursy Zemli.***
[Water balance and water resources of the Earth.]– L., Gidrometeoizdat. – 1974. – 639 p.
7. ***Glazovskij N.F.***
Global'nye zakonomernosti raspredelenija resursoemkosti jekonomiki. [Global regularities in allocation of economic resource intensity]. // Izv. RAN. – Ser. Geogr. – 1992, № 3. – p. 12–22.
8. ***Glazovskij N.F.***
Jeffektivnost' ispol'zovanija prirodnyh resursov i vozmozhnye porogi razvitija. [Efficiency of using natural resources and possible development thresholds].// Problemy prirodopol'zovanija i jekonomicheskaja situacija v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh gosudarstvah. Belgorod: 2004. – S. 9–15.
9. ***Danilov-Danil'jan V.I., Losev K.S.***
Potreblenie vody: jekologicheskie, jekonomicheskie, social'nye i politicheskie aspekty. [Water consumption: ecologic, economic, social and political aspects.]– M.: Nauka. – 2006. – 221 p.
10. ***Demin A.P.***
Sovremennaja vodoemkost' jekonomik stran mira.[Contemporary intensity of world economies].// Izv. RAN, ser. geograf. – 2012, № 5.
11. ***Demin A.P.***
Jekonomicheskie problemy vodopol'zovanija [Economic challenges of water use].// Jekonomicheskie i territorial'nye aspekty upravlenija vodohozjajstvennym kompleksom Rossii. – M., RASHN, 2013. – S. 240–273
12. ***Dumnov A.D.***
Mezhdunarodnye sopostavlenija vodopol'zovanija: nekotorye itogi [International comparisons of water use: some results].// Prirodno-resursnye vedomosti. – 2011, № 5. – p. 4.
13. ***Zajceva I.S.***
Antropogennye vozdejstvija na vodnye resursy stran «bol'shoj vos'merki» [Anthropogenic impact on water resources of G8 countries].// Voprosy geografii. – Sb. 133: – Geografo-gidrologicheskie issledovanija. – M., Izdatel'skij dom «Kodeks». – 2012. – S. 266–273.
14. ***Kljuev N.N.***
Rossija na jekologicheskoj karte mira [Russia on the ecological map of the world].// Vestnik Rossijskoj Akademii nauk. – T.72, № 8. – 2002. – p. 698–705.
15. ***Koronkevich N.I.***
Vodnyj balans Russkoj ravniny i ego antropogennye izmenenija. [Water balance of the Russian Plain and its anthropogenic changes]. – M., Nauka. – 1990. – 205 p.
16. ***L'vovich M.I.***
Mirovye vodnye resursy i ih budushhee. [World water resources and their future].– M., Mysl'. – 1974. – 448 s.
17. ***Rossija i strany mira.***
[Russia and other countries of the world].– 2008. – M.: Rostat. – 2008. – 361 p.
18. ***Shiklomanov I.A.***
Vlijanie hozjajstvennoj dejatel'nosti na rechnoj stok. [Impact of anthropogenic activities on rive runoff.]– L.: Gidrometeoizdat. – 1989. – 334 p.
19. ***Jekstremal'nye gidrologicheskie situacii.***
[Extreme hydrological situations].– M., Media-PRESS. – 2010. – 464 p.
20. ***Statistika stran mira.***
[World countries' statistics]. Jekonomika, chislennost' naselenija, gosudarstvennoe ustroj-stvo stran mira// http://iformatsiya.ru/.
21. ***Zubenok L.I.***
Isparenie na kontinentah. [Evaporation on the continents].– L., Gidrometeoizdat. – 1976. – 264 s.
22. ***Internet-resursy:***
http://www.mnr.gov.ru, http://www.oecdilibrary.org, http://epp.eurostat.ec.europa.eu, http://www.fao.org, http://www.minpriroda.by, http://www.menr.gov.ua, http://www.ausstats.abs.gov.au, http://www.ec.gc.ca.
23. ***Les prélèvements d'eau en France en 2009 et leurs évolutions depuis dix ans***
// Chiffres & Statistiques. – N290, Février. –2012.
24. ***Nominal 2012 GDP for the world and the European Union (EU).***
World Economic Outlook Database, October 2012. – International Monetary Fund. – Retrieved 2012–12–31.
25. ***Report for Selected Countries and Subject.***
World Economic Outlook Database, October 2012. – International Monetary Fund. Retrieved February 1, 2013.

Всероссийские научные конференции Научного совета Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши»*

Степанова М.И.

** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 08-06-00078г 09-05-06048г 10-05-06086г 11-05-06058г 12-05-06046г)*

Сотрудничество Российского фонда фундаментальных исследований с Научным советом Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши» (далее Научный совет) на протяжении последних лет в значительной степени способствовало успешной организации крупных всероссийских научных мероприятий, проводимых ежегодно. В их числе:

1. Всероссийская научная конференция «Стратегические проблемы водопользования России» (г. Азов, июль 2008 г.), организованная Научным советом совместно с Институтом водных проблем РАН и Федеральным агентством водных ресурсов (грант РФФИ № 08-06-00078г) в рамках основных мероприятий РАН по проведению в 2008 г. Международного года планеты Земля. На конференции заслушано и обсуждено более 50 докладов.

2. Всероссийская научная конференция «Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения» (г. Барнаул, июль 2009 г.), организованная Научным советом совместно с Институтом водных проблем РАН и Институтом водных экологических Сибирского отделения РАН (грант РФФИ № 09-05-06048г). На конференции заслушано и обсуждено 48 докладов.

3. Всероссийская научная конференция «Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России» (г. Краснодар, сентябрь 2010 г.). Конференция организована Научным советом совместно с Институтом водных проблем РАН при участии Кубанского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов (грант РФФИ № 10-05-06086г). На конференции заслушано и обсуждено 49 докладов.

4. Всероссийская научная конференция «Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий; риски их использования» (г. Калининград, июль-август 2011 г.). Конференция организована Научным советом совместно с Институтом водных проблем РАН и Атлантическим отделением Института океанологии РАН (грант РФФИ № 11-05-06058г). На конференции заслушано и обсуждено 89 докладов.

5. Всероссийская научная конференция «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике» (г. Цимлянск, июль 2012 г.). Конференция организована Научным советом совместно с Институтом водных проблем РАН и Северо-Кавказским филиалом Российского научно-исследовательского института водного хозяйства Федерального агентства водных ресурсов (грант РФФИ № 12-05-06046г). На конференции заслушано и обсуждено более 80 докладов.

Материалы всех конференций опубликованы при финансовой поддержке РФФИ в сборниках научных трудов.

В числе наиболее значимых приоритетных проблем, которые обсуждались на указанных конференциях, можно отметить следующие.

В 2008 г. основное внимание было уделено рассмотрению стратегических проблем водопользования России, в частности, их связь с мировым водным кризисом, проблемы рынков воды и водоемкой продукции, экономические проблемы водопользования и нормативно- правовое обеспечение, водные ресурсы и экологическая безопасность, региональные и трансграничные проблемы; методологические разработки по управлению водными ресурсами.

Сформулированы конкретные предложения о внесении необходимых из-

СТЕПАНОВА
Марианна Исааковна
кандидат технических наук, ученый секретарь Института водных проблем РАН; ученый секретарь Совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши».

менений и дополнений в действующий Водный кодекс Российской Федерации в части совершенствования экономических механизмов водопользования, нормативных документов, регламентирующих допустимые воздействия на водные объекты и др.

Рекомендации конференции учтены при разработке концепции «Водные ресурсы как стратегический фактор развития экономики России на долгосрочную перспективу», в которой обоснована необходимость усиления роли водохозяйственного комплекса в народном хозяйстве и разработки стратегий водопользования на фундаментальной научной основе с учетом обеспечения экономики страны водными ресурсами и прогноза потребностей мировой экономики в водоемкой продукции. Концепция была направлена в Федеральное агентство водных ресурсов и учтена при подготовке проекта Программы перспективного развития водного хозяйства страны как ресурсообеспечивающей отрасли экономики.

На конференции 2009 г. были рассмотрены вопросы оценки современного состояния водных ресурсов и качества вод, тенденций их природных и антропогенных изменений, разработки новых методов прогнозирования гидрологических процессов, оценки последствий экстремальных гидрологических событий и обоснование мер по снижению их негативного воздействия, проблемы совершенствования функционирования водохозяйственного комплекса, оптимального управления водопользованием и охраной вод в речных бассейнах, включая трансграничные.

Решения и рекомендации конференции использованы при подготовке проекта Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г. Этот документ разрабатывался в рамках Концепции долгосрочного социально-экономического развития страны для определения основных направлений действий по формированию и реализации конкурентных преимуществ России в водноресурсной сфере. Сформулированы основные стратегические цели и приоритетные направления развития водохозяйственного комплекса на период до 2020 г.: гарантированное обеспечение водными ресурсами устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации; сохранение и восстановление водных объектов до состояния, обеспечивающего экологически благоприятные условия жизни населения; обеспечение защищенности населения и объектов экономики от наводнений и иного негативного воздействия вод. Обоснованы приоритетные мероприятия, механизмы их выполнения, научное и научно-техническое обеспечение реализации стратегии.

Сборники трудов конференций 2010–2012 гг.

Всероссийская научная конференция «Стратегические проблемы водопользования России» (г. Азов, июль 2008 г.). Президиум конференции

Предложения направлены в Федеральное агентство водных ресурсов и легли в основу «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.», утвержденной Правительством РФ в 2009 г.

В 2010 г. обсуждались приоритетные научные и практические задачи, приобретающие особую и актуальность в условиях реализации Водной стратегии Российской Федерации: повышение надежности водообес-печения регионов России в условиях нарастающего дефицита водных ресурсов, экологически безопасное водопользование; обеспечение защищенности населения и объектов экономики от наводнений и иного негативного воздействия вод; регулирование и регламентация хозяйственного использования территорий, подверженных периодическому затоплению и воздействию других опасных гидрологических явлений; развитие системы комплексного мониторинга, в т.ч. прогнозирования и предупреждения экстремальных природных и техногенных ситуаций.

Всероссийская научная конференция «Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения» (г. Барнаул, июль 2009 г.). Обсуждение решения конференции

В принятом решении выделены первоочередные задачи, требующие законодательного регулирования; подчеркнута необходимость и предложены мероприятия, направленные на повышение надежности водообеспечения регионов России в условиях нарастающего дефицита водных ресурсов и обеспечение экологически безопасного водопользования; сформулированы меры по обеспечению безопасности страны на трансграничных водных объектах и водосборах, в первую очередь, совершенствование правового поля с учетом приоритетных интересов Российской Федерации.

Предложения и рекомендации учтены при подготовке документа «Аналитический обзор состояния научно-методического обеспечения первоочередных задач водохозяйственного комплекса России», направленного в Минприроды РФ.

В 2011 г. были рассмотрены вопросы, непосредственно связанные с решением задач Водной стратегии РФ: устойчивость водных объектов и водосборных территорий к природным и антропогенным воздействиям, механизмы и способы ее поддержания; методы оценки допустимых антропогенных нагрузок; мероприятия по ограничению природо- и водопользования для сохранения качества природных вод, благоприятных условий жизнедеятельности населения, обеспечения устойчивого функционирования и воспроизводства экосистем; природные и техногенные риски береговых зон морей и крупных водоемов: развитие принципов интегрированного управления водными ресурсами на основе согласования экологических, социальных и экономических требований.

Принятые решения и конкретные предложения по указанным вопросам учтены при подготовке проекта Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в рам-

ках реализации Водной стратегии не период 2020 г.», направленного в Минприроды РФ.

Работа конференции в 2012 г. была посвящена обсуждению актуальных проблем, решение которых входит в число приоритетных научных задач, связанных с реализацией Водной стратегии РФ. В их числе: состояние водных ресурсов, режима и качества вод суши в условиях изменений климата и усиливающейся антропогенной нагрузки на водные объекты и их водосборы; оценка роли водных ресурсов как одного из важнейших структурообразующих факторов реального сектора экономики России; определяющего в значительной степени территориальное размещение народного хозяйства; анализ влияния наблюдаемых и прогнозируемых изменений водных ресурсов и качества вод на социально-экономическое развитие страны, здоровье населения, состояние водных и наземных экосистем; обеспечение развития водохозяйственного комплекса страны; проблемы его устойчивого развития в условиях рыночных отношений при существенной неопределенности и нестационарности гидрологических, экологических и социально-экономических процессов; оценка роли водных ресурсов в решении проблем национальной безопасности; реализация принципов интегрированного управления водными ресурсами.

В рамках конференции был проведен Круглый стол по обсуждению причин и уроков катастрофического наводнения в районе г. Крымска. Участники отметили недостаточный уровень координации деятельности различных ведомств и органов регионального и местного управления по разработке и реализации превентивных мер и долгосрочных программ, направленных на оценку риска, прогнозирование и предотвращение последствий катастрофических наводнений в паводко-опасных регионах России.

В заключение необходимо подчеркнуть, что организация указанных

Всероссийская научная конференция «Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России» (г. Краснодар, сентябрь 2010 г.). Открытие конференции председателем оргкомитета членом-корреспондентом РАН В.И. Даниловым-Данильяном

конференций способствует развитию межведомственных и междисциплинарных исследований, концентрации усилий на приоритетных научных направлениях. Конференции неизменно привлекают внимание отечественных и зарубежных ученых в области исследований водных ресурсов, не случайно в них ежегодно принимает участие более 120 ведущих ученых и специалистов, представляющих научные коллективы Российской академии наук, крупных вузов страны, Минприроды РФ, Федерального агентства водных ресурсов, Росгидромета, проектные и производственные организации России, а также приглашенные иностранные ученые.

Всероссийская научная конференция ««Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике» (г. Цимлянск, июль 2012 г.). Работа конференции

Подписано в печать 04.09.2013. Формат 60 x 90 $^{1}/_{8}$.
Печ. л. 10. Тираж 1100 экз.

Оригинал-макет ЗАО «ИТЦ МОЛНЕТ»
123104, г. Москва, Малый Палашевский пер., д. 6
Тел./факс: (495) 927 0198,
e-mail: info@molnet.ru
Печать ООО «ТрансАвтоматизация»
121433, г. Москва, ул. Б. Филевская, д. 41, кор.1