

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.06:556.55: 556.5.06

О ПРОГНОЗЕ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ КРУПНЫХ ОЗЕР

Т. Ю. Выручалкина^{1,2}, Н. Н. Филатов², Н. А. Дианский^{2,3}, А. В. Гусев^{2,3}

¹ Институт водных проблем РАН

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

³ Институт вычислительной математики РАН

Работа посвящена оценке современного состояния и долгосрочному прогнозу внутривековых колебаний уровня воды крупных озер Евразии. На основе данных реанализа и результатов численного моделирования выполнен анализ влияния климатических изменений в Северной Атлантике на гидрологический режим водосборов Каспийского моря, Ладожского и Онежского озер. Выполнены оценки связи ряда индексов атмосферной и океанской циркуляции, описывающих климатическую изменчивость Северной Атлантики и Европы, с водным режимом бассейнов Волги и Невы. Исследованы причинно-следственные связи между климатическими характеристиками и гидрологическим режимом водосборов и уровнем озер. Показано запаздывание на несколько лет реакции гидрологического режима (стока рек, уровня Каспия) при изменениях атмосферной циркуляции. Динамика осадков на водосборе Каспия согласуется с изменениями циркуляционных индексов. Выполнена оценка транспорта влаги из Атлантики в европейскую часть России в XXI веке с использованием комбинированного сценария климатических изменений, основанного на композиции «парникового» и «циклического» эффектов. Результаты расчетов показывают возможное сокращение транспорта влаги и уменьшение атмосферных осадков на европейской части России в ближайшие 15–20 лет, в результате которого с задержкой в несколько лет будет продолжаться падение уровня воды Каспия и Ладожского озера. Приблизительно с 2035 до 2070 г. ожидается увеличение транспорта влаги, что должно привести к росту осадков и повышению уровня этих водоемов.

Ключевые слова: прогноз; уровень воды; озера; климат; изменчивость.

**T. Yu. Vyruchalkina, N. N. Filatov, N. A. Diansky, A. V. Gusev. ON
FORECASTING LONG-TERM VARIATIONS OF WATER LEVEL IN LARGE
LAKES**

The paper assesses the present-day state and long-term forecast of intrasecular oscillations of water level in large Eurasian lakes. The analysis of the North Atlantic climate

change influence on the catchments hydrological regime of the Caspian Sea and Ladoga and Onega lakes was made on the basis of the reanalysis data and numerical simulation results. The connection between some indexes of atmospheric and oceanic circulation describing climatic variability of the North Atlantic and Europe and hydrological regime of Volga and Neva rivers basins was estimated. The paper investigates the causal effects between climatic characteristics and catchments hydrological regime and the lakes water level. Several years' time lag of hydrological regime (rivers runoff, the Caspian Sea level) response to changes in atmospheric circulation was shown. The dynamics of precipitation in the Caspian catchment correspond to changes in circulation indexes. Moisture transport from the Atlantic to the European part of Russia in the 21st century was estimated using the combined scenario of climate changes based on the hybrid of greenhouse and cyclic effects. The simulation results reveal possible decrease of moisture transport and atmospheric precipitation over the European part of Russia for the next 15–20 years resulting (with several years' time lag) in the ongoing water level decrease in the Caspian Sea and Lake Ladoga. Moisture transport increase is expected from around 2035 to 2070, which will presumably lead to precipitation increase and water level rise in these water bodies.

Key words: forecast; water level; lakes; climate; variability.

Введение

Долгосрочный прогноз уровня воды крупных озер мира остается важной, но до сих пор не решенной фундаментальной и практической проблемой. Знание закономерностей внутри-вековой изменчивости уровня воды крупнейших (великих) озер Евразии и Северной Америки важно для обеспечения экономической деятельности на водосборе озер: безопасной работы водного транспорта, проведения берегозащитных работ, разработки мероприятий по адаптации экономики региона к дальнейшим изменениям уровня, которые прогнозируются до конца XXI века.

Выбор схемы и метода прогноза связан с поставленной задачей и зависит от необходимой заблаговременности, а также от внутренней структуры процесса изменчивости уровня воды в озерах. В практике гидрометеорологических прогнозов для великих озер Европы – Ладожского и Онежского – использовались методы межгруппового учета аргументов [Филатов, Филатова, 1990], авторегрессионные модели и другие подходы [Румянцев, Трапезников, 2008]. При расчетах, связанных с резкими антропогенными изменениями элементов водного баланса (ЭВБ) и нестационарностью изменений уровня как по математическому ожиданию, так и по дисперсии, например, для Каспия, вышеуказанные модели непригодны. Прогнозы (точнее, сценарии возможных изменений) многолетних изменений гидрологического режима Ладожского и Онежского озер были выполнены с использованием гидрологических моделей и моделей общей циркуляции атмосферы и океана [Климат..., 2004;

Rukhovets, Filatov, 2010]. По данным длительных измерений температуры приземного слоя атмосферы (ТПА) и атмосферных осадков, а также по результатам моделирования на модели ECHAM4/OPYC3 с учетом сценариев IPCC были построены карты-схемы распределения климатических характеристик и изменений ЭВБ для водосборов Ладожского и Онежского озер [Rukhovets, Filatov, 2010]. В этой работе было показано, что в новых климатических условиях для водосбора этих озер по двум сценариям [IPCC..., 2013] климатическая норма годовой ТПА может увеличиться к 2050 г. до 2–3 °С; годовые суммы осадков в средних многолетних значениях изменятся незначительно, речной сток уменьшится на 3–8 %, и при увеличении испарения на водосборе уровень воды в Ладожском и Онежском озерах до 2050 г. должен постепенно снижаться.

Полезным может быть опыт диагноза и прогноза изменений уровня Великих американских озер (ВАО), для которых были даны прогнозы многолетних изменений уровня воды вплоть до конца XXI века с использованием моделей глобального и регионального климата. Разработаны т. н. модели оффлайн и онлайн [Angel, Kunkel, 2009]. Создана система прогнозирования сезонных колебаний уровня воды, течений, температуры, льда, донных отложений «Great Lakes Coastal Forecasting System – GLCFS» для обеспечения водного транспорта, энергетики и других целей [Gronewold et al., 2013; MacKay, Seglenieks, 2013]. Имеется также развитая гидрологическая прогностическая система для ВАО (Great Lakes Advanced Hydrologic Prediction System – AHPS), которая представляет собой полуавтоматическую систему, комбинирующую

данные наблюдений с математическими моделями. С помощью этих моделей прогнозируется уровень воды и другие гидрологические переменные ВАО с заблаговременностью до 9 месяцев. По результатам моделирования с использованием 23 моделей земной системы климата (МЗС) при относительно низких, умеренных и высоких антропогенных воздействиях были выполнены оценки изменений климата в регионе и оценено влияние этих изменений на гидрологический режим водосбора ВАО [Lofgren et al., 2011]. С использованием МГК были выполнены расчеты по более чем 600 сценариям [Angel, Kunkel, 2009; Gronewold et al., 2013]. Оценки показали, что уровень воды ВАО, вероятнее всего, будет уменьшаться к концу XXI в. на 2–3 м, но по некоторым сценариям, может и подняться на величину до 1 м. При всех сценариях отклик уровня воды оз. Верхнего был наименьшим для Великих озер. Для озер Мичиган и Гурон средние изменения в уровнях к 2080–2094 гг. могут составлять от 0,25 до 0,41 м. В работе [Notaro, Bennington, 2015] с применением сочетания региональной и глобальной моделей с разрешением 24 км оценена реакция изменений гидрологического режима озера. С использованием одномерной озерной и гидрологической моделей рассчитывались климатические изменения в сезонном и многолетнем масштабах. Для разных сценариев и моделей были показаны как увеличение уровня воды озер, так и его падение до середины XXI в.

Многолетние изменения уровня Каспийского моря и составляющих его водного баланса исследуются на основе различных подходов. Использовались вероятностные модели, линейные и нелинейные стохастические модели [Раткович, 1993; Голицын и др., 1998]. Но прогнозы уровня моря с использованием этих подходов не оправдались. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что в конце XX века отмечался рост уровня моря, а с 1995 г. по настоящее время – снижение, превысившее метр. Попытки прогноза уровня Каспия с учетом прогноза антропогенных изменений климата [Будыко и др., 1988] также нельзя признать успешными. В работе [Фролов, 2003] предлагался способ расчета уровня режима Каспийского моря на долговременную перспективу (порядка 20 лет), с периодической корректировкой прогнозов с учетом фактического положения и тенденции изменения уровня моря, климатических параметров, определяющих формирование водного баланса моря, а также последствий антропогенной деятельности в бассейне водоема. В статье [Arpe, Roeckner,

1999] с использованием моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) показан возможный подъем уровня Каспия в XXI в. По результатам [Leroy, Arpe, 2007] и [Мелешко, 2008] с использованием трех и семи МОЦАО соответственно показано, что уровень моря в XXI веке не будет существенно изменяться. В работе [Elguindi, Giorgi, 2006] для разных сценариев (IPCC A2 и A1b) получено, что в течение XXI века по большинству моделей, напротив, ожидается устойчивое снижение уровня Каспийского моря.

Таким образом, представленные результаты демонстрируют как возможное снижение уровня озер, так и его повышение или стабилизацию в XXI веке. По разным расчетам уровня воды Великих американских озер и озер Евразии отмечается большая неопределенность в прогнозе внутривековых изменений уровня воды озер, что затрудняет планирование экономической деятельности и принятие мер по адаптации к возможным изменениям климата.

Оценка влияния климатической изменчивости Северной Атлантики на климат и гидрологический режим водосборов и уровень воды крупных озер

Анализ изменения климата и оценка влияния Северной Атлантики на гидрологический режим и уровень крупных озер европейской части России (ЕЧР) осуществлялись как непосредственно по данным длительных измерений (приземная температура воздуха, атмосферные осадки и атмосферное давление) на станциях Росгидромета (с середины XIX века до 2014 г.), так и по расчетным на их основе с шагом 0,5° по широте и долготе сеточным данным [Панин и др., 2015]. Такая дискретность является вполне приемлемой для исследования региональных изменений климата в бассейнах крупных водных объектов. Сеточные поля данных использовались как для получения осредненных характеристик по площади водосборов, административных образований и физико-географических зон, так и для построения карт месячных, сезонных и годовых характеристик температурно-влажностного режима ЕЧР.

Полученные результаты позволяют констатировать, что в целом за период 1946–2014 гг. на ЕЧР среднегодовая температура воздуха выросла на 1,7 °С, а сумма годовых осадков с 1960 г. – на 70 мм. Климатические изменения на ЕЧР происходили неоднородно, что ранее также отмечалось [Анисимов и др., 2003], и в их динамике отчетливо выделяется три периода. В 1946–1965 гг. – снижение среднегодовых

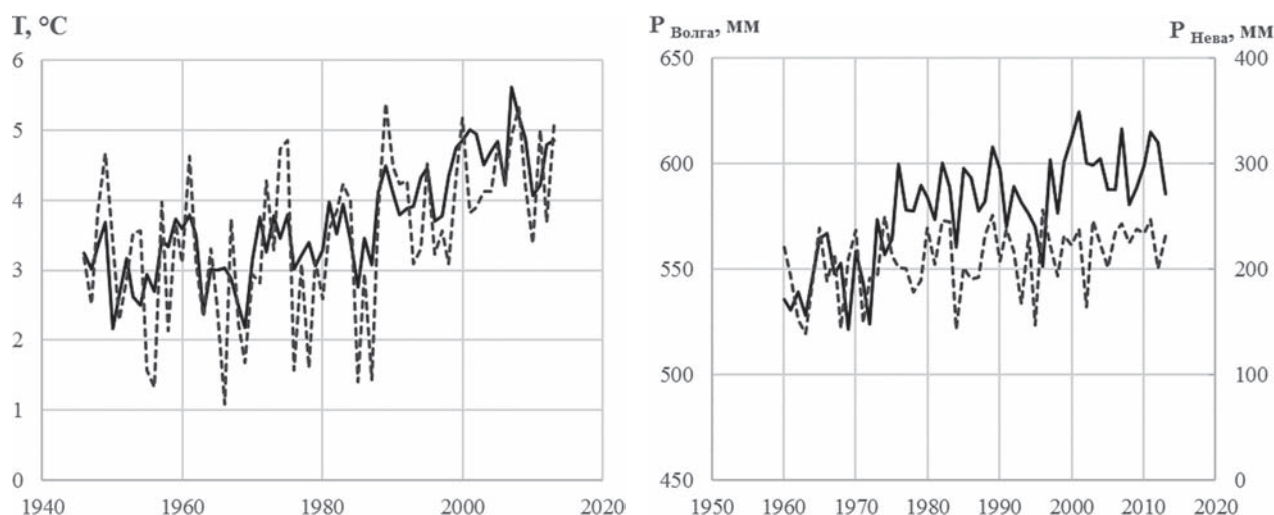


Рис. 1. Среднегодовые значения температуры воздуха (слева) и суммарные годовые осадки (справа) в бассейнах р. Волги (сплошная линия) и р. Невы (пунктирная линия) по данным 1946–2014 гг.

температур с ослаблением этой тенденции с севера на юг, причем основной вклад в похолодание приходился на холодный период года (ноябрь–март). В 1966–1995 гг. – повышение температур с ростом сумм годовых осадков, при этом температуры за ноябрь–март растут в среднем в 2 раза быстрее, чем за теплый период (апрель–октябрь). 1996–2014 годы отмечены наибольшим ростом среднегодовых температур ($0,84^{\circ}\text{C} / 10 \text{ лет}$) и уменьшением атмосферных осадков для регионов южнее 60° с. ш., с ростом температур теплого периода в ~ 2 раза быстрее, чем холодного. Однако в последние годы наметилась тенденция на замедление процесса потепления, а в зимние месяцы отмечается похолодание с усилением его с юга на север, что также было показано [Груза и др., 2008]. Вышесказанное иллюстрирует рисунок 1, где представлены графики колебания среднегодовой температуры и сумм годовых осадков, осредненных по площади бассейнов рек Волги и Невы. Анализ аномалий осадков, выполненный ранее [Панин и др., 2014], показал, что для бассейна р. Волги характерен их дефицит в летние и осенние месяцы в последние 10–15 лет.

В целом можно сделать вывод о том, что с удалением от полюсов амплитуда квазипериодических колебаний температур воздуха уменьшается. Проявление квазициклических эффектов более заметно в приполярных, чем в южных широтах ЕЧР из-за более сильного контраста в значениях альбеда для облаков и снежной поверхности [Панин и др., 2014]. Таким образом, можно сделать вывод, что отклонение температуры воздуха и атмосферных осадков в Северном полушарии от нормы

имеет широтную зависимость, что совпадает с выводами из 4-го и 5-го отчетов МГЭИК [IPCC..., 2007, 2013].

Хорошо известно (см., например, [Панин и др., 2015]), что колебания уровня Каспия тесно коррелируют с изменениями стока р. Волги. Анализ временной изменчивости осадков для водосбора Волги (рис. 1) за период с 1960 по 2013 г. также выявил наличие периодов их роста и спада, что неизбежно должно привести к изменению стока Волги. Между стоком Волги и суммарными годовыми осадками на ее водосборе взаимная корреляция составляет по абсолютной величине $r = 0,4$, а максимальное значение характерно для стока текущего года и осадков предшествующего $\sim 0,65$ [Панин и др., 2015]. Период роста объемов стока Волги и осадков до 1990 г. хорошо согласуется. Однако с начала 1990-х годов на водосборе Волги отмечается сокращение осадков за апрель–октябрь. В последние 10–15 лет уменьшаются и осадки за ноябрь–март, что способствует еще большему снижению стока Волги за последние годы. Отметим, что график колебания уровня Каспия за последние 25–35 лет имел бы вид более близкий к колебаниям стока Волги, если бы не производилось сначала регулирование оттока через залив Кара-Богаз-Гол посредством строительства дамбы [Фролов, 2003], а затем ее вскрытие в 1992 г. В целом смена тенденций колебания уровня Каспийского моря, изменение стока Волги и осадков на ее водосборе согласуются между собой. Принимая во внимание, что характер динамики стока р. Волги является определяющим в уровненом режиме Каспийского моря, можно констатировать, что колебания уровня моря

существенным образом зависят от режима атмосферных осадков в бассейне реки. Таким образом, качественный прогноз уровня режима Каспия может зависеть от точности прогнозирования гидрометеорологического режима, в особенности режима осадков в бассейне Волги.

Для надежного прогноза многолетних изменений гидрологического режима и водных экосистем требуется совершенствование знаний о закономерностях глобальных изменений климата и их связи с региональными изменениями. Влияние Атлантики на изменение уровня озер Евразии проявляется в конечном итоге за счет переноса тепла и влаги с акватории Северной Атлантики в регион ЕЧР [Малинин, 1994; Тужилкин и др., 2011]. Это влияние проявляется в изменчивости Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ), которая представляет собой крупномасштабный меридиональный круговорот воды в Северной Атлантике и в целом формирует меридиональный перенос тепла (МПТ) в высокие широты Северного полушария. Обнаруженный в работе [Голицын и др., 1990] тренд модуля скорости ветра дает основание предполагать возможность существования различий в многолетних тенденциях скорости ветра в зависимости от его направления на ЕЧР.

Изменчивость результирующего потока тепла между Северной Атлантикой и атмосферой, так же как и АТХЦ, характеризуется значительными долгопериодными (несколько десятков лет) колебаниями [Панин и др., 2014]. Интенсивность климатического воздействия Атлантического океана на вариации климата ЕЧР напрямую должна быть связана с величиной результирующего потока тепла между океаном и атмосферой. По результатам модельных расчетов на МОЦАО, разработанной в ИВМ РАН [Володин и др., 2013], эта величина колеблется от 14 до 21 Вт/м², достигая максимума в начале 1990-х. Интенсификация результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой в последние десятилетия XX века могла способствовать более мощному воздействию Атлантики на ЕЧР в этот период.

Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО) – процесс, который является следствием не только атмосферного воздействия, но и собственных долгопериодных колебаний океана, обусловленных изменчивостью термохалинной циркуляции в Северной Атлантике. Влияние АМО на формирование климатической изменчивости Европы должно осуществляться через динамику АТХЦ. Интенсивность АТХЦ характеризуется значительными долгопериодными

колебаниями, сопровождаемыми аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике [Latif et al., 2004]. По данным [Панин, Дианский, 2014], в 1960–1990 гг. происходило увеличение интенсивности АТХЦ, а с 1990-х гг. заметно падение ее интенсивности, которое проявляется также и для эволюции МПТ. Падение этих величин согласуется с ростом ТПО в указанные годы, проявляющимся в росте индекса АМО. Такой ход индексов АТХЦ и АМО объясняется тем, что при росте приповерхностной температуры и осадков в субарктических широтах следует ожидать уменьшения солености и плотности приповерхностного слоя Северного Ледовитого океана и арктических морей. Этому же способствуют таяние морских льдов и увеличение речного стока в арктический бассейн [Володин и др., 2013]. В результате должна увеличиться устойчивость верхнего слоя океана, приводящая к ослаблению высокоширотных конвективных процессов и интенсивности меридионального круговорота в Атлантике с соответствующим изменением положения и ослаблением Гольфстрима как одной из составляющих АТХЦ. Это в свою очередь может существенно сказаться на региональных особенностях климата высоких и средних широт Северного полушария, в частности европейского климата. Этот процесс может определять связь между долгопериодной изменчивостью АТХЦ и климатическими режимами в Евразии и Арктике [Martin, Ruprecht, 2007; Семенов и др., 2014].

Для оценки влияния климата Северной Атлантики на изменение климата ЕЧР и гидрологического режима водоемов в настоящей работе использовались индексы Североатлантического колебания (или North Atlantic oscillation – NAO), АМО, Скандинавской циркуляции (или Scandinavian pattern – SCA), Восточноатлантической циркуляции (или East Atlantic – EA), АТХЦ и др.

Согласованность в тенденциях хода уровня Каспийского моря с индексами NAO, EA, SCA, АМО, АТХЦ и МПТ свидетельствует о влиянии последних на динамику уровня моря (рис. 2). На рисунке представлены среднегодовые значения NAO и АТХЦ и средние значения АМО за март–май. Следует заметить, что изменение тенденций циркуляционных индексов происходит с опережением основных тенденций в уровне Каспия приблизительно на пять лет. Между колебаниями уровня Ладожского озера и циркуляционными индексами нет столь явной согласованности, но в то же время наблюдаются периоды синхронных тенденций (рис. 2). Все эти факты представляются важными, так как

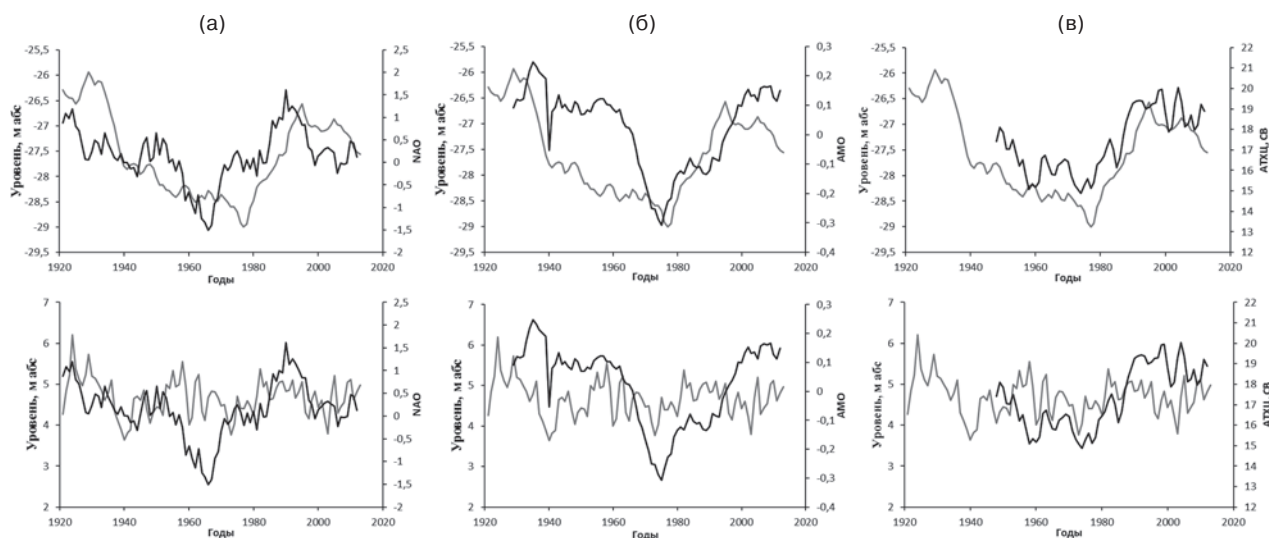


Рис. 2. Уровень Каспийского моря (сверху) и Ладожского озера (снизу) и индексы NAO (а), АМО (б) и АТХЦ (в). Уровень воды (серая кривая), циркуляционные индексы (черная кривая)

позволяют рассматривать используемые здесь индексы атмосферной и океанской циркуляций в качестве предикторов для долгосрочного прогнозирования уровня режима озер.

Корреляционный анализ показал, что между среднегодовым уровнем Каспийского моря и индексами EA, AMO, NAO, SCA корреляция составляет $\sim 0,5$ и выше. А корреляция между циркуляционными индексами, с одной стороны, и температурой и осадками, с другой, также достигает значений $0,4\text{--}0,5$ как по годовым, так и по сезонным параметрам. Наибольшие величины корреляции характерны для EA с приповерхностной температурой атмосферы (ПТА) $\sim 0,7$ и EA с атмосферными осадками $\sim 0,6$. Данные предварительно были сглажены скользящим средним по 9-летнему циклу с целью исключить при анализе процессов климатического масштаба высокочастотные колебания. По данным за 1946–1998 гг. наблюдается хорошая согласованность между среднегодовыми температурами на ЕЧР и всеми принятыми для расчетов индексами. В период 1960–2014 гг. влияние климатической изменчивости Северной Атлантики на температуру воздуха ЕЧР более заметно, с максимальными величинами в бассейне р. Волги. Схожая картина наблюдается в зависимости годовых осадков от климата Атлантики. На рисунке 3 представлены карты-поля корреляций между осадками и индексами NAO, EA и SCA. Наибольшие величины корреляции отмечаются на территории водосбора Волги.

Согласованность в тенденциях гидрометеорологических характеристик для ЕЧР с индексами атмосферной и океанической циркуляции позволяет сделать вывод, что колебания

уровня Каспийского моря и озер ЕЧР, очевидно, зависят от изменчивости климата Северной Атлантики. Так, уменьшение годовых сумм осадков на ЕЧР связано с ослаблением NAO, AMO и увеличением интенсивности SCA в последние 20 лет и сокращением выноса влаги в этот регион.

О прогностических сценариях изменений климата и влияния этих изменений на гидрологический режим водосборов Ладожского, Онежского озер и Каспийского моря

Ранее в работах [Панин, Дианский, 2014; Панин и др., 2015] были предприняты первые попытки по расчету транспорта влаги с Атлантики и его влияния на формирование климатической изменчивости озер ЕЧР. В настоящее время работа по уточнению потоков тепла и влаги на ЕЧР продолжена. Выполнены расчеты в рамках совместного анализа уравнения водного баланса моря и уравнения баланса влаги региона, включающего водоем и его бассейн, а также проведены эксперименты по воспроизведению циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости с помощью МОЦАО, разработанной в ИВМ РАН [Гусев, Дианский, 2014] и получившей в международной практике название INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Такой подход позволяет дать физическое объяснение изменений уровня крупных озер, включая Каспийское море, Ладожское, Онежское и Байкал, и, следовательно, сформировать их прогноз [Панин и др., 2015; Филатов и др., 2016].

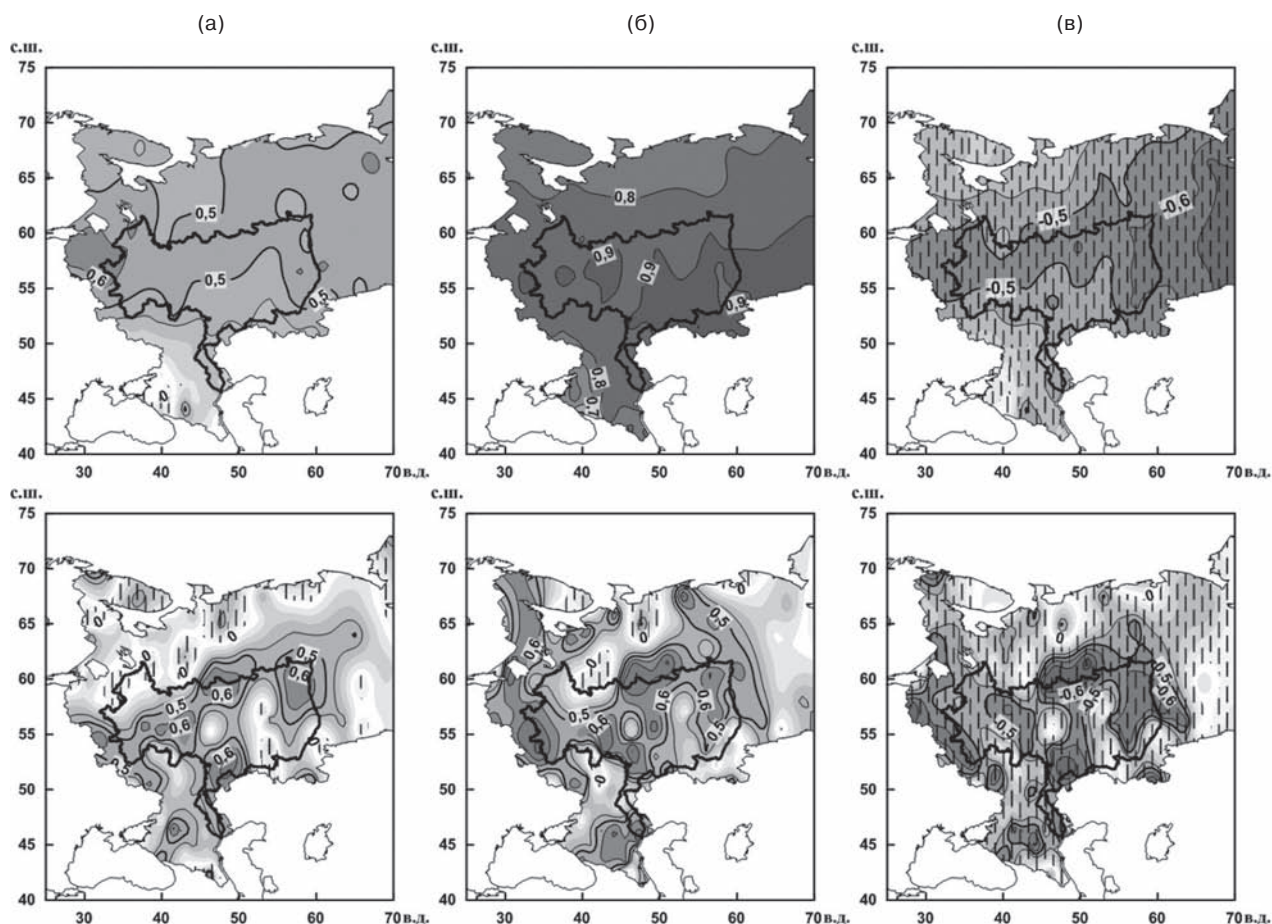


Рис. 3. Корреляция между среднегодовыми значениями температуры (сверху), годовыми осадками (снизу) и индексами NAO (а), EA (б) и SCA (в) за 1960–2014 гг. Жирная черная кривая – граница бассейна р. Волги

Покажем, как изменчивость гидрологического режима озер может быть описана с привлечением уравнений водного баланса озера и баланса влаги его бассейна. Выпишем уравнение водного баланса замкнутого водоема применительно к Каспийскому морю:

$$dh/dt = Q(t)/F(h) + P_L - E_L + U/F(h), \quad (1)$$

где $Q(t)$ – речной сток; U – подземный сток; $F(h)$ – площадь зеркала моря при уровне моря h ; P_L и E_L – атмосферные осадки и испарение над зеркалом моря.

Далее запишем уравнение баланса влаги над регионом, включающим водоем и его бассейн, в следующем виде:

$$dW/dt + W_r = E - P, \quad (2)$$

где W – интегральное влагосодержание атмосферы над регионом; W_r – суммарный поток влаги через боковую границу Γ рассматриваемого региона; P и E – соответственно атмосферные осадки и испарение, проинтегрированные по площади региона. Уравнение (2) получают путем интегрирования уравнения для влажности

атмосферы [Малинин, 1994] по площади рассматриваемого региона и от поверхности земли до некоторой большой высоты, на которой содержание влаги пренебрежимо мало по сравнению с нижележащими слоями. В уравнениях (1) и (2) будем полагать, что все переменные являются среднегодовыми величинами и производные по времени характеризуют межгодовую изменчивость.

В случае Каспийского моря слагаемым $U/F(h)$ можно пренебречь, поскольку $U/F(h) \approx (0.01 \dots 0.02)E_L$ [Панин, Дианский, 2014].

Учитывая также, что среднегодовой речной сток определяется в основном разностью осадков и испарения на водосборе, положим $Q(t)/F(h) = (P/F(h) - P_L) - (E/F(h) - E_L)$. Тогда из уравнения (1) получим соотношение:

$$dh/dt = (P/F(h) - P_L) - (E/F(h) - E_L) + P_L - E_L \equiv (P - E)/F(h), \quad (3)$$

показывающее, что изменения уровня Каспийского моря определяются балансом осадков и испарения во всем регионе.

Сравнивая уравнения (2) и (3), получаем, что изменение уровня Каспийского моря может быть определено в виде:

$$\frac{dh}{dt} = \left(\frac{dW}{dt} + W_r \right) \left(-\frac{1}{F(h)} \right) \approx -W_r / F(h). \quad (4)$$

Из (1)–(4) следует, что изменение атмосферных осадков, испарения и уровня моря существенным образом зависит от интенсивности горизонтального переноса воздушных масс.

Количество переносимой влаги зависит от содержания влаги в самой атмосфере над Северной Атлантикой. И рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{1}{g} \int_{P_n}^{P_0} \overline{qu} \, dP,$$

где q – массовая доля влаги (удельная влажность); u – горизонтальный вектор ветра; g – ускорение свободного падения; P_0 и P_n – давление у поверхности моря и на верхней границе выбранного слоя атмосферы. В работе [Панин и др., 2015] было показано, что транспорт влаги (ТВ), выносимой с Северной Атлантики на территорию Европы, хорошо согласуется с изменениями термохалинной циркуляции океана и индексами атмосферной циркуляции.

По данным длительных измерений были отмечены определенные долгопериодные компоненты в изменениях климата с временными масштабами 30–60 лет, имеется также квазидвухлетняя цикличность и флуктуации с временными масштабами в несколько лет [Монин, Сонечкин, 2005; Володин, 2016]. Природа этих колебаний климата изучена недостаточно хорошо, проявляются они асинхронно в разных регионах. Это непериодические колебания, хотя ряд авторов пытаются выявить такие периодические компоненты для гидрологического режима водоемов и водосборов. Но эти изменения, как отмечается в [Мохов и др., 2013], представляют собой некий осциллятор, при котором система совершает колебания, показатели которых циклически повторяются во времени с изменением амплитуды, временного масштаба и взаимодействий. Эти климатические осцилляторы порождают сложную изменчивость климата на фоне тренда, вызванного антропогенными причинами изменений климата. В частности, с мультideкадной осцилляцией связано замедление потепления, которое проявляется в последние два десятилетия. Важно также отметить, что оценки будущего климата с использованием МОЦАО дают возможность получить не точные прогнозы, а сценарии будущих изменений климата и их влияния на гидрологический режим водоемов.

В работе [Панин и др., 2009] предложена идея, позволяющая дать объяснение не только роста температуры, вызванного эмиссией парниковых газов, но и изменчивости климата с временными масштабами порядка нескольких десятилетий (50–60 лет). Этот подход базируется на композиции «парникового» и «циклического» эффектов:

$$\Delta T \approx \Delta T_{IPCC} + k \sin \omega t,$$

где ΔT – прогнозируемая температура приземного воздуха; ΔT_{IPCC} – температура, прогнозируемая МГЭИК; ω – циклическая частота колебаний климата; k – эмпирический коэффициент, зависящий от местоположения. Данная идея применима и к прогнозу ТВ.

Для уточнения прогнозных оценок изменений климата на территории ЕЧР была использована база данных реанализа NCEP/NCAR. Атмосферные характеристики NCEP/NCAR включают в себя глобальные поля данных, из которых в расчете ТВ используются удельная влажность и скорость ветра на восьми уровнях (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400 и 300 гПа). Далее будут представлены некоторые результаты, полученные в рамках использования комбинированного сценария климатических изменений (комбинация трендовой и циклической составляющей изменений).

Физико-статистический прогноз климатических изменений характеристик циркуляции атмосферы на период 2010–2071 гг. на основе данных 1948–2009 гг.

В качестве исходных данных рассматриваются атмосферные характеристики из базы NCEP за 1948–2009 гг. Для удобства исключаем из них внутригодовую изменчивость, получая набор среднегодовых двумерных глобальных полей $F_T = F_T(\lambda, \varphi, t)$, где T – физический параметр, для которого строится приближение (в данном случае ТВ); $t \in [0, N]$ – время в годах, $N = 62$ – количество лет длины рядов за 1948–2009 гг.; λ – долгота; φ – широта.

Выделим из исходных данных две основные составляющие:

1. Линейный тренд $F_T^{lin} = A \cdot t + B$;
2. 60-летние колебания $F_T^{cos} = C \cdot \cos(\omega \cdot (t - t_0)) + D$,

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – циклическая частота колебаний в рад/с; $T = 60$ лет – принятая оценка периода циклических климатических колебаний согласно [Панин и др., 2009]; $t_0 = 43$ – момент времени, соответствующий 2000 году, когда наблюдался максимум 60-летнего колебания.

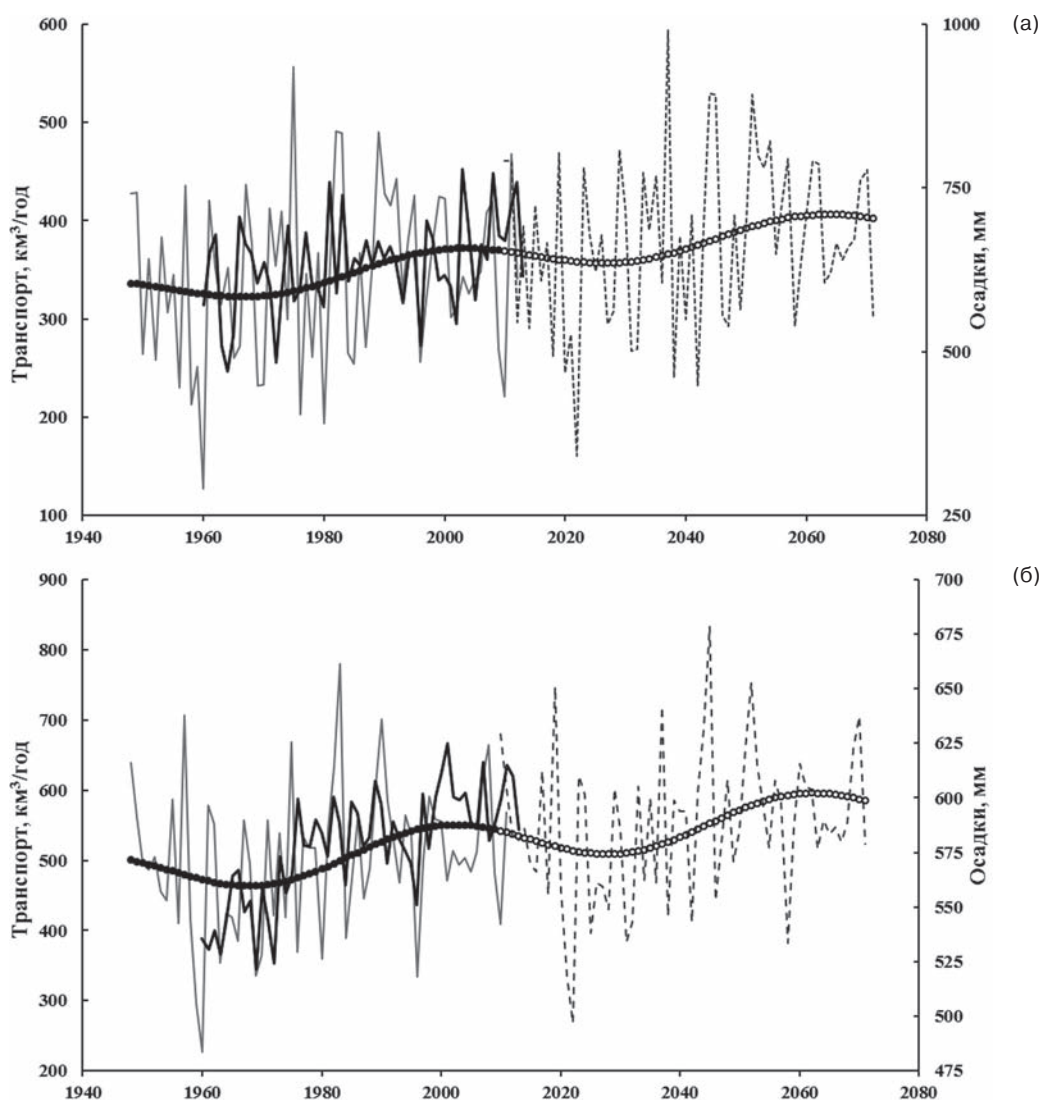


Рис. 4. Комбинированный сценарий изменения горизонтального транспорта влаги ($\text{км}^3/\text{год}$) в XX столетии и прогноз его тенденций в XXI столетии:

а – поступление в бассейн р. Невы ($26,5^\circ$ в. д.), б – поступление в бассейн р. Волги (35° в. д.). Значения F_T (черные точки), изменения T_B (серая линия), атмосферные осадки на водосборе рек (жирная черная линия)

Коэффициенты A , B , C , D являются также двумерными полями, характеризующими каждую точку в пространстве по отдельности, которые рассчитываются по методу наименьших квадратов (МНК).

Изменение данных по времени можно представить как сумму линейного тренда и синусоиды $F_T = F_T^{\text{lin}} + F_T^{\text{cos}}$. При этом оценку этого выражения можно провести двумя способами. В первом случае из исходного ряда сначала выделяется линейный тренд, а затем из остатка – синусоида. Во втором – наоборот. Следует отметить, что при получении данных для прогноза требуется информация о межгодовой изменчивости, которая может быть получена вычитанием тенденции из исходных данных.

Результаты комбинированного сценария изменения транспорта влаги в Северном полушарии, в бассейнах Ладожского и Онежского озер и Каспийского моря-озера.

Для оценки тенденции T_B были реализованы оба способа, отличающиеся последовательностью выделения линейного тренда и синусоиды из исходного ряда, в результате чего были рассчитаны тенденции F_T^1 и F_T^2 соответственно. При этом итоговая тенденция рассчитывалась как полусумма этих тенденций: $F_T = \frac{1}{2}F_T^1 + \frac{1}{2}F_T^2$ (далее – комбинированный сценарий). На рисунке 4 представлены результаты комбинированного сценария изменения

ТВ в XX столетии и прогноз его тенденций в XXI столетии, показавший лучший результат, чем каждое из исходных приближений в отдельности. ТВ через границу бассейнов р. Невы (27,5° в. д.) и р. Волги (35° в. д.) был выполнен с временным интервалом 1 год для слоя атмосферы от 1000 до 300 гПа. Для р. Невы расчет проводится в диапазоне от 57,5° до 62,5° с. ш., для р. Волги – 52–60° с. ш. Данные на рисунке получены путем описанного выше метода комбинированного сценария. Для этого на основе данных ТВ, полученных при расчете на основе БД NCEP, были рассчитаны значения F_T (черные точки). Затем на эти данные (долгосрочную изменчивость) были наложены межгодовые аномалии изменения ТВ (серая линия), взятые, за неимением лучшего, из предыдущего 62-летнего периода. На рисунке 4 представлена динамика транспорта влаги на высоте 1,5 км (850 гПа), как горизонта с наибольшим значением транспорта влаги. Оставшимся горизонтам свойственны аналогичные изменения ТВ во времени, но с меньшим абсолютным значением. Как видно из рисунка 4, полученный сценарий воспроизводит особенности динамики климата Северной Атлантики, о которых мы упоминали выше (рис. 2). Сравнение результатов расчета ТВ с данными об атмосферных осадках на водосборах Волги и Невы показывает достаточно хорошую их согласованность в период 1948–2009 гг.

В работе [Панин и др., 2015] было показано, что в целом колебания уровня Каспийского моря обусловлены сменой тенденций в транспорте влаги с Атлантики на его бассейн. Действительно, с 1970-х годов величины транспорта влаги с Атлантики на ЕЧР росли и достигли максимальных значений в 1990-х годах. Этот период роста переноса влаги согласуется как с увеличением стока рек Волги и Невы, так и с повышением уровня Каспийского моря, а также Ладожского и Онежского озер. Но в конце 1990-х тенденция изменилась. В настоящее время продолжается сокращение транспорта влаги из Атлантики на ЕЧР (в частности, в бассейн Волги и Невы). На этом фоне наблюдается уменьшение стока рек и падение уровня озер и Каспийского моря. Из рисунка 4 видно, что по комбинированному сценарию в ближайшие 15–20 лет (примерно до 2035 г.) ожидается тенденция на снижение ТВ на ЕЧР. Следовательно, можно предположить, что в ближайшие несколько лет продолжится падение уровня Каспия и Ладожского и Онежского озер. Далее до 2070 г. ожидается новый период повышенного выноса влаги с Атлантики.

Выводы

Выполнен анализ влияния климатических изменений в Северной Атлантике на гидрологический режим водосборов Каспийского моря-озера, Ладожского и Онежского озер. Даны оценки связи индексов атмосферной и океанской циркуляции (NAO, AMO, EA, SCA и АТХЦ) и причинно-следственные связи между климатическими характеристиками и гидрологическим режимом водосборов и уровнем озер. Показано запаздывание на несколько лет реакции гидрологического режима (стока рек, уровня Каспия) при изменениях атмосферной циркуляции. Динамика осадков на водосборе Каспия согласуется с изменениями циркуляционных индексов. Эти данные представляются важными, так как позволяют рассматривать используемые индексы атмосферной и океанской циркуляции в Северной Атлантике в качестве предикторов для совершенствования прогнозирования уровня режима крупных озер.

Использован предложенный в работе [Панин и др., 2009] т. н. комбинированный сценарий климатических изменений, базирующийся на композиции «парникового» и «циклических» эффектов. Этот подход позволяет описывать не только рост температуры воздуха, вызванный эмиссией парниковых газов, но и известную по данным наблюдений изменчивость климата с временными масштабами в несколько десятков (порядка 60) лет. Результаты расчетов показывают возможное сокращение транспорта влаги и уменьшение атмосферных осадков на ЕЧР в ближайшие 15–20 лет, из-за чего с временным сдвигом в несколько лет будет продолжаться падение уровня воды Каспия, а также Ладожского озера. Режим уровня Онежского озера регулируется работой ГЭС, и здесь не так заметно влияние возможных изменений климата. Примерно с 2035 до 2070 г. транспорт влаги из Атлантики увеличится, что приведет к росту осадков и повышению уровня этих водоемов.

В целом можно отметить, что как для Каспия, Ладожского и Онежского озер, так и для Великих американских озер отмечается большая неопределенность долгосрочного прогноза внутривековых изменений уровня вод [Филатов и др., 2016]. Это существенно затрудняет планирование экономической деятельности, принятие мер по адаптации к возможным региональным изменениям, разработку мер по рациональному использованию и охране ресурсов водоемов. Поэтому важной задачей остается совершенствование системы прогноза внутривековых и сезонных изменений колебаний уровня воды, гидрологического режима

и экосистем великих озер Евразии и Северной Америки.

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН при финансовой поддержке РФФ (грант № 14-17-00740).

Литература

- Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., Лобанов В. А. Современные изменения климата в области высоких широт Северного полушария // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 18–29.
- Будыко М. И., Ефимова Н. А., Лобанов В. В. Будущий уровень Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1988. № 5. С. 86–94.
- Володин Е. М., Дианский Н. А., Гусев А. В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 4. С. 379–400.
- Володин Е. М. Представление потоков тепла, влаги и импульса в климатических моделях. Потоки с поверхности // Фунд. и прикл. климатология. 2016. Т. 1. С. 28–42.
- Голицын Г. С., Дзюба А. В., Осипов А. Г., Панин Г. Н. Региональные изменения климата и их проявления в современном подъеме уровня Каспийского моря // ДАН СССР. 1990. Т. 313, № 5. С. 1224–1227.
- Голицын Г. С., Раткович Д. Я., Фортус М. И., Фролов А. В. О современном подъеме уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 2. С. 133–139.
- Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В. Изменения климата на территории России: температура воздуха и атмосферные осадки // В кн.: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 6: Изменения климата: влияние земных и внеземных факторов / Отв. ред. Г. С. Голицын. М.: ИФА РАН, ИФЗ РАН, 2008. С. 11–23.
- Гусев А. В., Дианский Н. А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 3–15.
- Климат Карелии. Изменчивость и влияние на водные объекты / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. 224 с.
- Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: РГГМИ, 1994. 160 с.
- Мелешко В. П., Катцов В. М., Мирвис В. М. и др. Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета // Метеорология и гидрология. 2008. № 8. С. 5–19.
- Монин А. С., Сонечкин Д. М. Колебания климата. М.: Наука, 2005. 192 с.
- Мохов И. И., Акперов М. Г., Прокофьева М. А. и др. Блокинг в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449, № 5. С. 582–585.
- Панин Г. Н., Дианский Н. А. О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 3. С. 304–316.
- Панин Г. Н., Соломонова И. В., Выручалкина Т. Ю. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 743–756.
- Панин Г. Н., Соломонова И. В., Выручалкина Т. Ю. Режим составляющих водного баланса Каспийского моря // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 5. С. 488–495.
- Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Воздействие Северной Атлантики на гидрологический режим бассейна Каспийского моря // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 4. С. 442–452.
- Раткович Д. Я. Современные колебания уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1993. Т. 20, № 2. С. 160–171.
- Румянцев В. А., Трапезников Ю. А. Стохастические модели гидрологических процессов. М.: Наука, 2008. 152 с.
- Семенов В. А., Шелехова Е. А., Мохов И. И. и др. Роль Атлантического долгопериодного колебания в формировании сезонных аномалий температуры воздуха в Северном полушарии по модельным расчетам // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 3 (302). С. 215–223.
- Тужилкин В. С., Косарев А. Н., Архипкин В. С., Никонова Р. Е. Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2011. № 2. С. 62–71.
- Филатов Н. Н., Филатова И. В. Закономерности изменчивости внешнего водообмена и уровня крупных озер // Труды V Гидрологического Съезда. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 73–81.
- Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А. и др. Внутривековая изменчивость уровня крупнейших озер России // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467, № 5. С. 589–593.
- Фролов А. В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 174 с.
- Angel J. R., Kunkel K. E. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron // Journal of Great Lakes Research, Supplement 2, 2009. Vol. 36. P. 51–58.
- Arpe K., Roeckner E. Simulation of the hydrological cycle over Europe: Model validation and impacts of increasing greenhouse gases // Advances in Water Resources. 1999. Vol. 23, no. 2. P. 105–119.
- Elguindi N., Giorgi F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations // Geoph. Res. Letter. 2006. Vol. 33. L08706.
- Gronewold A. D., Fortin V., Lofgren B. et al. Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective // Climatic Change. 2013. 120. P. 697–711. doi: 10.1007/s10584-013-0840-2

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html (дата обращения: 10.08.2016).

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (дата обращения: 10.08.2016).

Latif M., Roeckner E., Botzet M. et al. Reconstructing, monitoring, and predicting decadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature // *J. Climate*. 2004. Vol. 7. P. 1605–1614.

Leroy S. A. G., Arpe K. Glacial refugia for summer-green trees in Europe and South-West Asia as proposed by echam³ time-slice atmospheric model simulations // *Journal of Biogeography*. 2007. Vol. 34, no. 12. P. 2115–2128.

References

Anisimov O. A., Belolutskaia M. A., Lobanov V. A. Sovremennye izmeneniya klimata v oblasti vysokikh shirot Severnogo polushariya [Contemporary climate changes in the Northern Hemisphere high latitudes]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2003. No. 1. P. 18–29.

Budyko M. I., Efimova H. A., Lobanov V. V. Budushchii uroven' Kaspiiskogo morya [Future level of the Caspian Sea]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 1988. No. 5. P. 86–94.

Filatov N. N., Filatova I. V. Zakonomernosti izmenchivosti vneshnego vodoobmena i urovnya krupnykh ozer [Variability patterns of the external water exchange and large lakes water level]. *Trudy V Gidrologicheskogo S'ezda* [Proceed. of V Hydrological Congress]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. P. 73–81.

Filatov N. N., Vyruchalkina T. Yu., Dianskii N. A., Nazarova L. E., Sinyukovich V. N. Vnutrivenkovaya izmenchivost' urovnya krupneishikh ozer Rossii [Intrasecular variability in the level of Russia's largest lakes]. *Doklady Akademii nauk* [Dokl. Earth Sci.]. 2016. Vol. 467, no. 5. P. 589–593.

Frolov A. V. Modelirovanie mnogoletnikh kolebanii urovnya Kaspiiskogo morya: teoriya i prilozheniya [Modeling the long-term fluctuations of the Caspian Sea level: theory and applications]. Moscow: GEOS, 2003. 174 p.

Golitsyn G. S., Dzyuba A. V., Osipov A. G., Panin G. N. Regional'nye izmeneniya klimata i ikh proyavleniya v sovremennom pod'eme urovnya Kaspiiskogo morya [Regional climate changes and their revealing in the contemporary rise of the Caspian Sea level]. *DAN SSSR*

Lofgren B. M., Hunter T. S., Wilbarger J. Effects of using air temperature as a proxy for potential evapotranspiration in climate change scenarios of Great Lakes basin hydrology // *J. Great Lakes Research*. 2011. Vol. 37. P. 744–752.

MacKay M., Seglenieks F. On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change // *Climatic Change* 2013. Vol. 117 (12). P. 55–67.

Martin T., Ruprecht E. Decadal variation of the North Atlantic meridional heat transport and its relation to atmospheric processes // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34, L04703, doi: 10.1029/2006GL028438

Notaro M., Bennington V. Dynamical Downscaling – Based Projections of Great Lakes Water Levels // *J. of Climate*. 2015. Vol. 28, no. 24. P. 9721–9745. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00847197210-9745

Rukhovets L. A., Filatov N. N. (Eds). Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observation and Modeling. Springer-Praxis Publishing. 2010. 320 p.

The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). URL: <http://www.ncep.noaa.gov> (дата обращения: 10.08.2016).

Поступила в редакцию 30.08.2016

[*Proceed. of the USSR Acad. of Sc.*]. 1990. Vol. 313, no. 5. P. 1224–1227.

Golitsyn G. S., Ratkovich D. Ya., Fortus M. I., Frolov A. V. O sovremennom pod'eme urovnya Kaspiiskogo morya [On the contemporary rise of the Caspian Sea level]. *Vodnye resursy* [Water Resources] 1998. Vol. 25, no. 2. P. 133–139.

Gruza G. V., Ran'kova E. Ya., Rocheva E. V. Izmeneniya klimata na territorii Rossii: temperatura vozdukh i atmosferynye osadki [Climate change in Russia: air temperature and atmospheric precipitation]. In: *Izmenenie okruzhayushchei sredy i klimata: prirodnye i zvyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy* [Environment and climate change: natural and involved technogenic disasters]. 2008. Vol. 6. P. 11–23.

Gusev A. V., Dianskii N. A. Vosproizvedenie tsirkulyatsii Mirovogo okeana i ee klimaticheskoi izmenchivosti v 1948–2007 gg. s pomoshch'yu modeli INMOM [Simulating of the World Ocean circulation and its climatic variability for 1948–2007 using the INMOM]. *Izv. RAN. Fiz. atm. i okeana* [Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2014. Vol. 50, no. 1. P. 3–15.

Klimat Karelii. Izmenchivost' i vliyanie na vodnye ob'ekty [Climate of Karelia: variability and influence on water bodies]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. 224 p.

Malinin V. N. Problema prognoza urovnya Kaspiiskogo morya [The Caspian Sea level forecast]. St. Petersburg: RGGMI, 1994. 160 p.

Meleshko V. P., Kattsov V. M., Mirvis V. M., Govorkova V. A., Pavlova T. V. Klimat Rossii v XXI veke. Chast' 1. Novye svidetel'stva antropogennogo izmene-

niya klimata i sovremennyye vozmozhnosti ego rascheta [Climate of Russia in the 21st century. Part 1. New evidence of human impact on climate change and the state of the art of its simulation]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2008. No. 8. P. 5–19.

Monin A. S., Sonechkin D. M. Kolebaniya klimata [Climate fluctuations]. Moscow: Nauka, 2005. 192 p.

Mokhov I. I., Akperov M. G., Prokof'eva M. A., Timazhev A. V., Lupo A. R., Le Tret Je. Blokingi v Severnom polusharii i Evro-Atlanticheskoy regione: ocenki izmenenij po dannym reanaliza i model'nym raschetam [Blockings in the Northern Hemisphere and Euro-Atlantic region: estimates of changes from reanalysis data and model simulations]. *Doklady Akademii nauk* [Dokl. Earth Sci.]. 2013. Vol. 449, no. 5. P. 582–585.

Panin G. N., Dianskii N. A. O svyazi kolebanii urovnya Kaspiiskogo morya i klimata Severnoi Atlantiki [On the connection between the Caspian Sea level and the North Atlantic climate]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2014. Vol. 50, no. 3. P. 304–316.

Panin G. N., Solomonova I. V., Vyruchalkina T. Yu. Klimaticheskie tendentsii v srednikh i vysokikh shirotakh Severnogo polushariya [Climatic trends in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2009. Vol. 36, no. 6. P. 743–756.

Panin G. N., Solomonova I. V., Vyruchalkina T. Yu. Rezhim sostavlyayushchikh vodnogo balansa Kaspiiskogo morya [Regime of water balance components of the Caspian Sea]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2014. Vol. 41, no. 5. P. 488–495.

Panin G. N., Vyruchalkina T. Yu., Solomonova I. V. Vozdeistvie Severnoi Atlantiki na gidrologicheskii rezhim basseina Kaspiiskogo morya [Effect of the North Atlantic on the hydrological regime of the Caspian Sea Basin]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2015. Vol. 42, no. 4. P. 442–452.

Ratkovich D. Ya. Sovremennyye kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya [Contemporary fluctuations of the Caspian Sea level]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1993. Vol. 20, no. 2. P. 160–171.

Rumyantsev V. A., Trapeznikov Yu. A. Stokhasticheskie modeli gidrologicheskikh protsessov [Stochastic models of hydrologic processes]. Moscow: Nauka, 2008. 152 p.

Semenov V. A., Shelekhova E. A., Mokhov I. I., Zuev V. V., Koltermann K. P. Rol' Atlanticheskogo dologosrochnogo kolebaniya v formirovaniy sezonnykh anomalii temperatury vozdukh v Severnom polusharii po model'nym raschetam [Role of the long-term Atlantic oscillation in the formation of seasonal air temperature anomalies in the Northern Hemisphere according to model calculations]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmos. Ocean. Opt.]. 2014. Vol. 27, no. 3 (302). P. 215–223.

Tuzhilkin V. S., Kosarev A. N., Arkhipkin V. S., Nikonova R. E. Mnogoletnyaya izmenchivost' gidrologicheskogo rezhima Kaspiiskogo morya v svyazi s variatsiyami klimata [Long-term variability of the Caspian Sea hydrological regime in relation to climate variations]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography]. 2011. No. 2. P. 62–71.

Volodin E. M., Dianskii N. A., Gusev A. V. Vosproizvedenie i prognoz klimaticheskikh izmenenii v XIX–XXI vekakh s pomoshch'yu modeli zemnoi klimaticheskoy sistemy IVM RAN [Simulation and prediction of climate changes in the 19th to 21st centuries with the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, model of the Earth's climate system]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2013. Vol. 49, no. 4. P. 379–400.

Volodin E. M. Predstavlenie potokov tepla, vlagi i impul'sa v klimaticheskikh modelyakh. Potoki s poverkhnosti [Representation of heat, moisture and momentum fluxes in climate models. Fluxes at surface]. *Fund. i prikl. klimatologiya* [Fundamental and Applied Climatology]. 2016. Vol. 1. P. 28–42.

Angel J. R., Kunkel K. E. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron. *Journal of Great Lakes Research*, Supplement 2, 2009. Vol. 36. P. 51–58.

Arpe K., Roeckner E. Simulation of the hydrological cycle over Europe: Model validation and impacts of increasing greenhouse gases. *Advances in Water Resources*. 1999. Vol. 23, no. 2. P. 105–119.

Elguindi N., Giorgi F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. *Geoph. Res. Letter*. 2006. Vol. 33. L08706.

Gronewold A. D., Fortin V., Lofgren B., Clites A., Stow C. A., Quinn F. Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective. *Climatic Change*. 2013. 120. P. 697–711. doi: 10.1007/s10584-013-0840-2

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html (accessed: 10.08.2016).

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (accessed: 10.08.2016).

Latif M., Roeckner E., Botzet M., Esch M., Haak H., Hagemann S., Jungclaus J., Legutke S., Marsland S., Mikolajewicz U., Mitchell J. Reconstructing, monitoring, and predicting decadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature. *J. Climate*. 2004. Vol. 7. P. 1605–1614.

Leroy S. A. G., Arpe K. Glacial refugia for summer-green trees in Europe and South-West Asia as proposed by echam³ time-slice atmospheric model simulations. *Journal of Biogeography*. 2007. Vol. 34, no. 12. P. 2115–2128.

Lofgren B. M., Hunter T. S., Wilbarger J. Effects of using air temperature as a proxy for potential evapotranspiration in climate change scenarios of Great Lakes basin hydrology. *J. Great Lakes Research*. 2011. Vol. 37. P. 744–752.

MacKay M., Seglenieks F. On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change. *Climatic Change* 2013. Vol. 117 (12). P. 55–67.

Martin T., Ruprecht E. Decadal variation of the North Atlantic meridional heat transport and its relation to atmospheric processes. *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34, L04703, doi: 10.1029/2006GL028438

Notaro M., Bennington V. Dynamical Downscaling – Based Projections of Great Lakes Water Levels.

J. of Climate. 2015. Vol. 28, no. 24. P. 9721–9745. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00847197210-9745

Rukhovets L. A., Filatov N. N. (Eds). Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observation and Modeling. Springer-Praxis Publishing. 2010. 320 p.

The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). URL: <http://www.ncep.noaa.gov> (accessed: 10.08.2016).

Received August 30, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Выручалкина Татьяна Юрьевна

научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333
эл. почта: vyruchi@list.ru
тел.: +74991355374

Филатов Николай Николаевич

главный научный сотрудник, советник РАН, чл.-корр. РАН,
д. г. н., проф.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru

Дианский Николай Ардадьевич

ведущий научный сотрудник, доцент,
д. ф.-м. н.
Институт вычислительной математики РАН
ул. Губкина, 8, Москва, Россия, 119333
эл. почта: nikolay.diansky@gmail.com
тел.: +79268206665

Гусев Анатолий Владимирович

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Институт вычислительной математики РАН
ул. Губкина, 8, Москва, Россия, 119333
эл. почта: anatoly.v.gusev@gmail.com
тел.: +79032467187

CONTRIBUTORS:

Vyruchalkina, Tatiana

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences
3 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: vyruchi@list.ru
tel.: +74991355374

Filatov, Nikolai

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru

Diansky, Nikolai

Institute of Numerical Mathematics,
Russian Academy of Sciences
8 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: nikolay.diansky@gmail.com
tel.: +79268206665

Gusev, Anatoly

Institute of Numerical Mathematics,
Russian Academy of Sciences
8 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com
tel.: +79032467187