

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГИДРОЛОГИИ  
УСТЬЕВ РЕК (К 90-ЛЕТИЮ В.Н. МИХАЙЛОВА)

УДК 556.545

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
В ОБСКОЙ ГУБЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ  
ИЗМЕНЕНИЙ НА ЕЕ ВОДОСБОРЕ<sup>1</sup>

© 2022 г. М. В. Третьяков<sup>a, \*</sup>, А. И. Шикломанов<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, 199397 Россия

<sup>b</sup>Университет Нью Гемпшира, Durham, NH, 03824 USA

\*e-mail: tmv@aari.ru

Поступила в редакцию 21.12.2021 г.

После доработки 21.03.2022 г.

Принята к публикации 29.03.2022 г.

Изменения стока рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, связанные с изменениями климата, а также с растущей антропогенной нагрузкой, приводят к закономерным трансформациям гидрологических процессов в устьевых областях рек. Последовательное применение климатической, воднобалансовой и гидродинамической моделей позволило оценить влияние на сезонные гидрологические процессы в Обской губе климатических и антропогенных изменений на ее водосборе. Выявлено, что изменение климата и существенное сезонное перераспределение стока рек на водосборе Обской губы, главным образом за счет его увеличения в зимний период, не привело к значимым изменениям сезонных гидрологических устьевых процессов за период 1980–2018 г. Оценки, выполненные на перспективу до 2050 г., показали, что при реализации различных климатических сценариев изменения на водосборе приведут к увеличению речного стока, что будет способствовать меньшему проникновению соленых вод в губу.

*Ключевые слова:* Обская губа, сезонные гидрологические процессы, водосбор, хозяйственная деятельность, климатические изменения.

**DOI:** 10.31857/S0321059622050169

## ВВЕДЕНИЕ

Устьевые области рек Арктической зоны Российской Федерации в настоящее время стали представлять самостоятельный и особый интерес для водообеспечения населения и для развивающейся хозяйственной деятельности. Изменения гидрологических устьевых процессов, формирующих положение фронтальных зон, глубину залегания галоклина, изменения уровня воды, глубину конвекции, ледовые фазы и другие характеристики, влияют как на водохозяйственную деятельность в устьевых областях, так и на биотическую составляющую экосистемы и соответствующие отрасли хозяйственной деятельности.

Обская губа – важнейший природный и хозяйственный ресурс для стабильного и устойчивого развития наиболее экономически быстро развивающегося региона Российской Арктики. Однако слабая изученность этого района, неразвитая си-

стема наблюдений и отсутствие надежных прогнозов изменений гидрологических процессов в Обской губе под влиянием внешних факторов повышает риски негативных последствий для всего регионального водохозяйственного комплекса. Природные и антропогенные изменения на водосборах крупных рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, через речной, тепловой сток и сток наносов оказывают влияние на гидрологические процессы в устьевых областях рек и на прилегающих морских акваториях. Существенные изменения отмечены в последние десятилетия и на водосборе Обской губы. Они включают в себя изменения объема и внутригодового распределения речного стока [27, 39], теплового и ледового режима рек [30, 38, 51], дренирование термокарстовых озер [40, 44], таяние вечной мерзлоты [34, 42] и растущее водопотребление, особенно в южных районах на территории Китая и Казахстана [8, 21]. Безусловно, вышеперечисленные процессы на водосборе, наряду со значительными изменениями климатических характеристик над акваторией Обской губы, оказывают

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60192, Национального фонда науки США (грант 1913962).

влияние на различные гидрологические процессы в губе. Следует отметить, что данные наземных и спутниковых наблюдений за гидрологическими, метеорологическими характеристиками и подстилающей поверхностью в регионе весьма ограничены и не позволяют провести детальный анализ многолетних гидрологических изменений Обской губы. Поэтому, для того чтобы оценить современные изменения различных гидрологических характеристик в Обской губе и установить основные влияющие на них факторы, наиболее оптимальным представляется использование комплекса математических моделей, учитывающих региональные изменения климата, гидрологические и антропогенные процессы на водосборе и непосредственно в Обской губе.

При современной активизации хозяйственной деятельности в устьевых областях рек Российской Арктики актуальна оценка возможных изменений состояния устьевых систем по комплексу гидрологических параметров с учетом их специфики.

Из крупных устьевых объектов Российской Арктики Обская губа особенно выделяется наличием наиболее масштабных проектов по освоению месторождений углеводородов на прибрежной территории, строительству крупных предприятий их переработки и новых портовых сооружений для их транспортировки. При этом особенность ее региональной экономики — сочетание двух экономических укладов: традиционного и промышленного [16]. В этой связи изменения гидрологических процессов в губе могут повлиять на экологическое состояние губы и затронуть различные аспекты хозяйственной и социальной сферы. Устьевые процессы подвержены влиянию внешних систем реки, моря и атмосферы и определяются природными (естественными) и антропогенными факторами [11].

В данной работе выполнена оценка современных и ожидаемых в перспективе изменений гидрологических процессов в Обской губе под влиянием изменения климата и других природных и антропогенных факторов, формируемых на ее водосборе, на основе модельных экспериментов с использованием модели регионального климата, гидрологической модели водосбора, учитывающей хозяйственную деятельность, и трехмерной гидродинамической модели Обской губы.

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ

Климатические и антропогенные изменения на водосборе реки влияют на устьевые процессы через формируемый на этом водосборе речной сток. Характеристики стока рек водосбора Обской губы имеют ярко выраженную сезонную из-

менчивость с четко выраженным весенне-летним половодьем (в основном формируемым за счет снеготаяния), летне-осенней меженью с периодическими дождевыми паводками и продолжительной зимней меженью. Анализ многолетней изменчивости стока крупных рек, впадающих в Обскую губу, показывает небольшое увеличение годового стока [39] и значительный рост расходов воды в зимний период [43], что характерно и для других рек водосборного бассейна Северного Ледовитого океана [39, 46].

На устьевом участке реки от замыкающего створа в г. Салехарде до Обской губы, т. е. до морского края дельты, происходит трансформация речного стока. С местного водосбора устьевой области, куда входят бассейны рек Надым, Пур, Таз и др., впадающих в Обскую и Тазовскую губы, осуществляется речной сток. На устьевом взморье происходит динамическое взаимодействие вод реки и моря с их физико-химическими свойствами. Ключевой гидрологический устьевой процесс — проникновение соленой морской воды на сотни километров в губу, влияющее на динамические, тепловые и ледовые условия. Взаимодействие пресной и морской вод с формированием вертикального и горизонтального градиента солености — основная характеристика экосистемы Обской губы. Обская губа, как и морская система и водосбор, находится под влиянием тепло-массообмена с атмосферой. Литодинамические процессы, происходящие в губе и прилегающих районах моря, изменяют очертания берегов и подводный рельеф. На все элементы системы оказывается прямое или опосредованное антропогенное влияние. Общая схема влияния внешних факторов на систему Обской губы представлена на рис. 1.

Имеющиеся данные береговой гидрометеорологической сети не могут дать полное представление о характеристиках гидрологических процессов внутри Обской губы [4]. Дистанционные методы (ледовая авиаразведка, авиатермосъемка, спутниковые снимки) дают более подробную информацию о состоянии поверхности устьевых областей, однако сведения о многих процессах можно получить только посредством зондирования водной толщи при экспедиционных исследованиях. Существующих натуральных данных о процессах взаимодействия морских и речных вод в губе оказывается недостаточно для оценок их сезонных характеристик, поскольку остается неизвестным, что происходит с термохалинными полями между съемками, насколько зафиксированные наблюдениями распределения полей температуры и солености отражают сезонный ход этих полей и предельные состояния системы. Большие акватории оказываются между пунктами измерений, и о гидрологическом режиме в этих районах можно судить только исходя из дан-

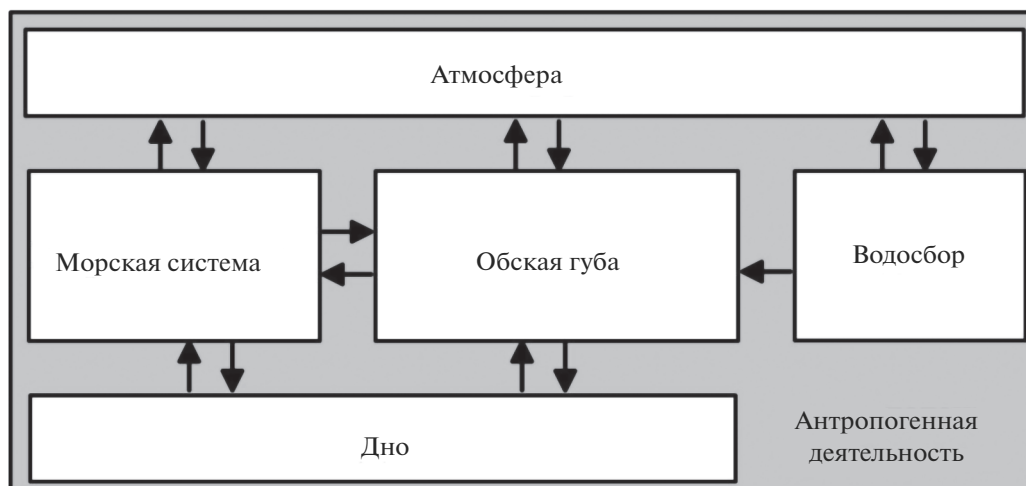


Рис. 1. Схема влияния внешних факторов на Обскую губу.

ных на их границах. Сложность процессов, происходящих в устьевых областях рек, их большой пространственный и временной масштаб, разрозненность натуральных данных, особенно в переходные периоды, не позволяют использовать для этого простые методы интерполяции (например, линейную интерполяцию), вследствие чего требуется привлечение методов гидродинамического моделирования. Оценка состояния и проблемы развития технологий ведения оперативного мониторинга гидрологических процессов в устьевых областях рек Арктики в условиях регулирования стока и климатических изменений на базе комплекса натуральных наблюдений и математического моделирования приведены в работе [18]. Численное моделирование гидрологических процессов в Обской губе в последние годы интенсифицировалось в связи с необходимостью оценки влияния на ее состояние построенного на морском баре подходного канала [2, 3, 6, 20]. Как правило, моделируется один годовой цикл для разных граничных условий с учетом приливо-отливных и синоптических процессов.

Для исследования влияния на гидрологические процессы в Обской губе климатических и антропогенных изменений на ее водосборе предлагается рассмотренную систему (рис. 1) несколько упростить и реальные природные объекты заменить их модельным отображением.

При исследовании влияния сезонных и многолетних изменений речного стока на устьевые процессы целесообразно исключить из рассмотрения те гидрофизические процессы, которые могут помешать надежной интерпретации результатов модельных расчетов: русловые процессы, антропогенную деятельность в самой губе, изменения среднего уровня моря, межгодовые изменения термохалинной структуры воды на морской гра-

нице губы под влиянием морской системы, а также кратковременные изменения, связанные с приливоотливными и синоптическими явлениями, поскольку процессы внутrigодовой (сезонной) изменчивости всецело определяют особенности структуры вод Обской губы и являются фоном, на котором прослеживается изменчивость структуры вод меньших временных масштабов [4]. На данном этапе из рассмотрения исключаются также процессы распространения и трансформации заморных вод в Обской губе.

Таким образом, при ограничении системы в сезонном масштабе времени процессами динамического взаимодействия вод реки и моря, смещения речных и морских вод основными элементами системы являются уровень воды, скорости потока и плотность воды, которая определяется температурой и соленостью. Со стороны речной системы влияющие факторы — речной сток и температура воды, со стороны моря — соленость и температура воды моря. Со стороны атмосферы происходит динамическое воздействие на верхний слой, а также на температуру воды, при охлаждении которой до температуры замерзания происходит образование льда, экранирующего водную толщу губы от потоков тепла и импульса на границе вода—атмосфера.

Пространственно система выделяется береговым контуром, свободной поверхностью и дном, а также границами со стороны реки и моря. Поскольку в системе не учитываются русловые процессы, то донная поверхность и очертания берегов принимаются неизменными.

#### *Гидродинамическая модель Обской губы*

Для объективной интерполяции гидрологических полей внутри Обской губы по немногочис-

ленным данным наблюдений и модельных оценок на границах губы использована трехмерная гидродинамическая модель Принстонского университета [22], учитывающая наличие циркуляции, связанной с плотностной неоднородностью и устойчивой стратификацией, наличие существенных долгопериодных (стоковых) колебаний уровня, которые по амплитуде сопоставимы с глубинами. Моделирование сезонных гидрологических процессов проводится с учетом процессов образования и таяния льда, толщина которого опять же сопоставима с глубинами [17].

Опыт моделирования гидрологических процессов в Обской губе для оценки влияния поддонного канала в губе на ее состояние показывает, что достаточно мелкая сетка приводит к увеличению машинного времени, что затрудняет моделирование за многолетний период [2, 6]. Поэтому для моделирования Обской губы авторами статьи использована сетка с размером ячейки  $4 \times 4$  км, которая позволяет воспроизводить сезонные гидрологические процессы и их межгодовую изменчивость практически по всей акватории Обской и Тазовской губ с наименьшими затратами машинного времени. При таком размере ячейки из расчетной области исключаются места, содержащие менее трех узлов сетки. В результате сеткой охвачена Обская губа от морского края дельты до выхода в море (разрез о. Вилькицкого — о. Белый), Тазовская губа от п. Находка до слияния с Обской губой. По вертикали расчетная область разбивается на 20 слоев от дна до поверхности воды или нижней поверхности погруженного в воду льда.

Для удовлетворения граничных условий на морской границе расчетной области задаются осредненные распределения температуры и солености воды по данным многолетних измерений на разрезе о. Вилькицкого — о. Белый в летний и зимний периоды. В качестве граничных условий со стороны реки задаются расход и температура воды с дискретностью 1 сут. Сток больших рек Оби и Надым задается на створах, проходящих по морским краям дельт, совместный сток рек Пур и Таз задается на створе, проходящем у п. Находка. При впадении реки широким потоком, охватывающим несколько узлов сетки, на речных границах расчетной области сток воды распределяется по узлам сетки пропорционально глубине.

Натурные данные о расходах имеются на замыкающих створах рек, которые расположены несколько выше этой границы. На протяжении устьевого участка речной сток претерпевает определенную трансформацию, определяемую не только временем добегаания, но и боковой приточностью. Для пересчета расхода воды от замыкающего створа до морского края дельты использована модель трансформации стока [14], основанная на методе Калинина—Милюкова [10],

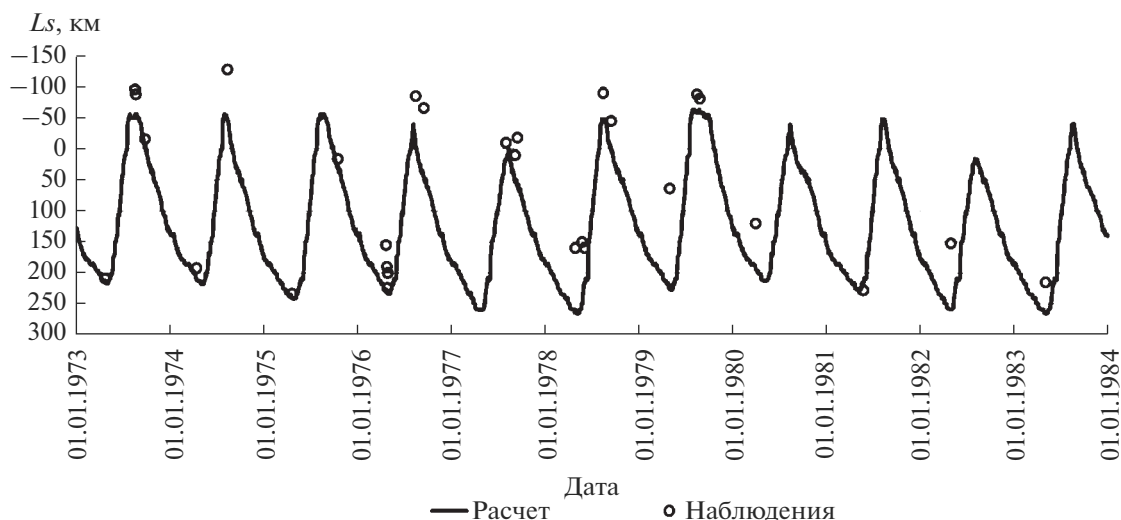
параметры которой подобраны в соответствии с рекомендациями, изложенными в [15].

Также задается сток малых и средних рек с местного водосбора в местах их впадения в губу. В этих же створах задаются сведения о температуре воды. Поскольку данные наблюдений за стоком с местного водосбора Обской губы практически отсутствуют, то для получения этих сведений использованы данные моделирования стока на воднобалансовой модели, которая рассмотрена ниже. Пространственное разрешение этой модели позволило рассчитать сток 196 водотоков, непосредственно впадающих в губу, помимо крупных рек Оби, Надым, Пур, Таз [4], что составляет сток с 96% неизученной части водосбора. Хотя сток с неизученной части водосбора  $\leq 10\%$  от среднегодового притока речных вод, он играет важную роль в летний период, когда его вклад может достигать 15%. Поэтому речной и тепловой сток малых рек также необходимо учитывать, чтобы более надежно смоделировать гидродинамические процессы в Обской губе.

Потоки тепла и импульса на границах атмосфера—вода и атмосфера—лед вычисляются по данным стандартных наблюдений за метеорологическими характеристиками на береговой гидрометеорологической сети или по данным моделирования.

Трехмерная гидродинамическая модель Обской губы апробирована на материалах комплексных экспедиций ААНИИ за 1970—1980-х гг. и на данных береговой сети наблюдений. Период с 1976 по 1983 г. наиболее обеспечен информацией о граничных условиях для модельных расчетов. За этот период, выбранный для апробации модели, имеется наиболее полная информация о гидрологических полях и о их динамике внутри области и на ее границах. Набор состояний гидрологической системы в этот период достаточно репрезентативен. По водности впадающих рек в этот период можно выделить маловодный 1977 и многоводный 1979 гг. Ранняя весна наблюдалась в 1976 и 1977 гг., им соответствует ранее вскрытие ледяного покрова. Холодная весна была в 1978 г. (температура воздуха меньше нормы на  $2-3^\circ\text{C}$ ) и в 1979 г., им соответствует позднее вскрытие ледяного покрова. Холодная осень с ранним замерзанием губы наблюдалась в 1976 и 1977 гг.

На рис. 2 показана моделируемая дальность интрузии морских вод  $L_s$ , выделяемая по изохалине  $1\text{‰}$  у дна, в Обской губе в сопоставлении с данными наблюдений. Видно, что в целом расчет соответствует наблюдениям. Следует отметить, что наблюдаемая  $L_s$  имеет очень большую погрешность, так как расстояние между разрезами в среднем  $>50$  км, съемки на разрезах выполнялись последовательно (не синхронно), а наблюдения проводились в разные фазы сгонно-нагонных яв-



**Рис. 2.** Дальность проникновения морских вод  $L_s$  (по изохалине 1‰ у дна) в Обскую губу по данным моделирования и по данным наблюдений. За ноль километража принят траверз п. Тамбей.

лений и приливного цикла. Но к настоящему времени это единственные хоть в какой-то мере системные наблюдения за  $L_s$  в Обской губе, к тому же выполненные в годовом цикле, включая периоды ее максимального развития.

#### *Гидрологическая модель водосбора*

Для оценки притока речных вод в Обскую губу, в том числе малых и средних рек водосбора губы, использована гидрологическая воднобалансовая модель WBM (Water Balance Model), разработанная в Университете Нью Гемпшира (США) [50]. Данная модель в различных модификациях используется в разных проектах в США и России, например для оценки речного и углеродного стока рек Аляски [33], оценки стока крупных Арктических рек на перспективу [36, 40], краткосрочного прогноза речного и теплового притока в моря северо-восточной части США и оценки влияния хозяйственной деятельности на сток рек в различных регионах мира [24, 53]. Ее основное преимущество заключается в том, что она учитывает влияние хозяйственной деятельности на водосборе (руслевое регулирование, орошение, коммунальное и промышленное водопотребление, а также межбассейновые переброски стока), что имеет важное значение для бассейна Оби. Помимо этого, все программные элементы модели WBM с 2022 г. будут в свободном доступе в сети Интернет вместе с детальным описанием их применения. Другие гидрологические модели, разработанные в России, например модели ЕСОМАГ [31] или Гидрограф [49], не находясь в открытом доступе, требуют существенной предварительной подготовки программы, наличия дополнительных исходных данных для параметризации и ва-

лидации, а также не учитывают в полной мере хозяйственную деятельность на водосборе. Гидрологическая воднобалансовая модель WBM представляет собой сеточную модель, воспроизводящую вертикальный водообмен между атмосферой и земной поверхностью и горизонтальный перенос речного стока по русловой сети. Для оценки вклада различных составляющих в формирование речного притока в Обскую губу гидрологическая модель WBM функционально расширена блоком, позволяющим отслеживать величину основных гидрологических компонентов речного стока (подземный сток, снеговой сток, дождевой сток и ледниковый сток) и их трансформацию по русловой сети, а также оценивать изменения запасов воды в почве, озерах и водохранилищах. Оценка стока с ледников проводится в WBM на основе расчетов по модели ледникового стока [28, 35]. Для более надежного моделирования водообмена почвенных и грунтовых вод в модель был добавлен новый алгоритм MODFLOW, который представляет собой наиболее современный блок расчета подземного питания, разработанный Геологической Службой США. Дополнительно для улучшения расчета стока в горных районах в WBM добавлен блок, который позволяет учитывать изменение снеготоплив с высотой местности в пределах одной ячейки сетки на основе данных о рельефе местности высокого пространственного разрешения. Для оценки термального стока в WBM добавлен блок моделирования температуры воды на основе метода, изложенного в [45].

Помимо моделирования естественного гидрологического режима, WBM также позволяет учитывать влияние разных видов хозяйственной дея-

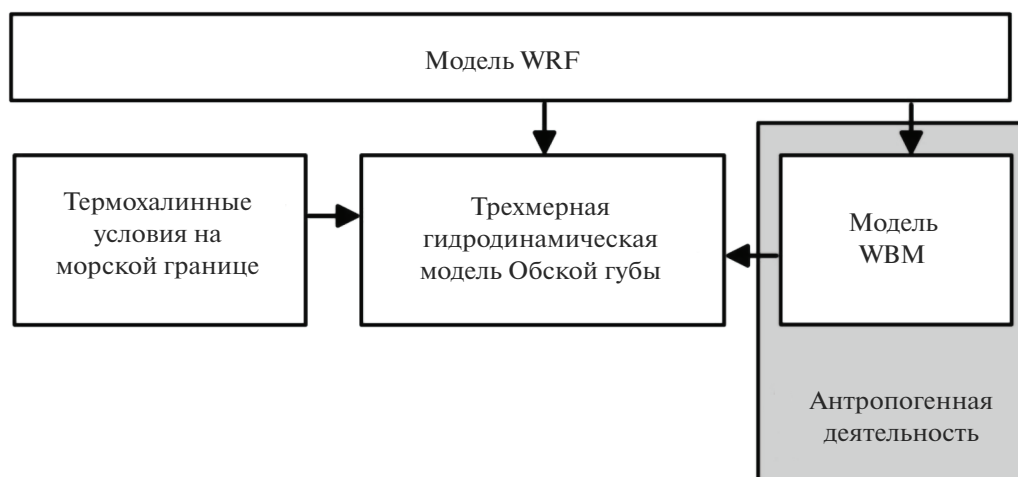


Рис. 3. Схема моделирования сезонных гидрологических процессов в Обской губе.

тельности на гидрологические характеристики, включая такие наиболее важные для рассматриваемого водосбора антропогенные факторы, как регулирование речного стока водохранилищами и дамбами [50], водопотребление на орошение [24, 25] и межбассейновые переброски стока [52]. Для того чтобы оценить влияние локальной хозяйственной деятельности на сток рек в исследуемом бассейне, приток речных вод и термальный сток в Обскую губу, расчеты на модели WBM выполнялись для естественных гидрологических условий и с учетом хозяйственной деятельности на водосборе, включая регулирование стока водохранилищами, орошение, коммунальное и промышленное водопотребление, а также водозабор в канал Иртыш–Караганда. Все расчеты на WBM выполнялись по суточным интервалам времени для речной сети с пространственным разрешением 10 км × 10 км. Для расчета испарения и транспирации использовался метод Пенмана–Мантисса, который наиболее надежно учитывает испарение с подстилающей поверхности в регионах недостаточного увлажнения и активного землепользования, к которым можно отнести южную часть водосбора Обской губы. Моделирование трансформации речного стока по русловой сети выполнялось на основе метода линейных резервуаров с переменной функцией добега в зависимости от объема стока, что позволило существенно улучшить результаты моделирования.

#### Региональная климатическая модель

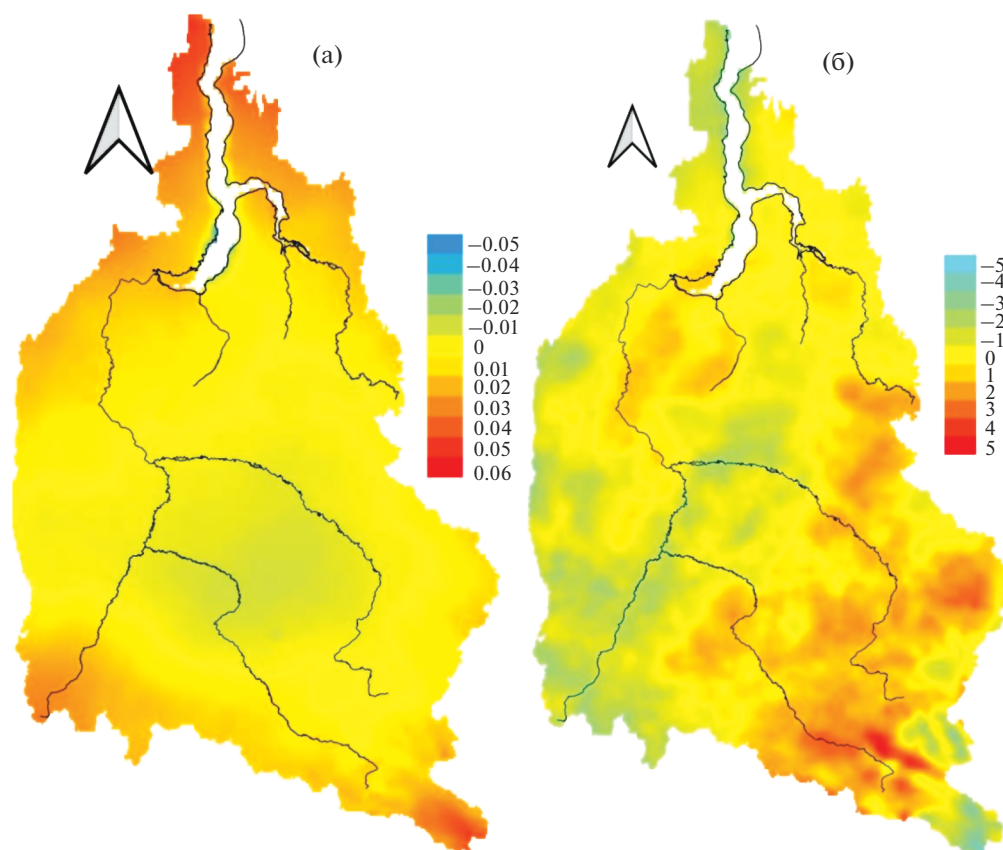
Для представления климатической ситуации в водосборном бассейне Обской губы использована региональная климатическая модель WRF (Weather Research and Forecasting), которая широко используется в мире для метеорологических прогнозов [32]. Данная модель была адаптирована

на для исследуемой территории, охватывающей водосборный бассейн Обской губы и прилегающие районы. WRF представляет собой современную региональную систему моделирования, включающую в себя все необходимые компоненты для воспроизведения динамики атмосферы [41]. Для исследуемого региона использована полярная версия Polar WRF (версия 3.5.1), оптимизированная для Арктики и созданная в Полярном центре исследований климата в Университете штата Огайо [26]. Модель Polar WRF включает в себя модернизированные физические схемы наземных и океанических параметризаций приземного слоя, настроенных специально для Арктики. Граничные условия для модели WRF заданы из реанализа NCEP/NCAR [29]. Расчеты на модели выполнялись с пространственным разрешением 30 км × 30 км. Модельные расчеты проводились для периода с 1979 до 2018 г. Отклонения рассчитанных полей WRF от наблюдений и реанализов откорректированы согласно методике, описанной в [23]. Хотя данная климатическая модель рассчитывает множество различных параметров атмосферы на различных высотах, для целей настоящего исследования использовались только данные приземного слоя.

Результаты модельных расчетов на WRF и WBM отображаются в виде карт и доступны через региональную онлайн-систему для Северной Евразии [48], разработанную в Университете Нью Гэмпшира.

Таким образом, схема влияния внешних факторов на систему Обской губы, представленная на рис. 1, для целей данного исследования преобразована в схему взаимодействия математических моделей различного назначения (рис. 3).





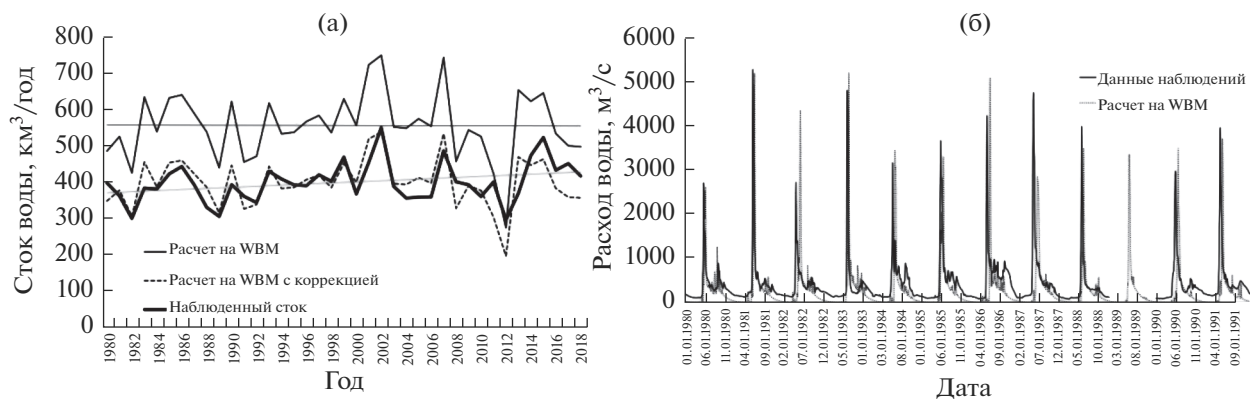
**Рис. 4.** Изменение среднегодовой температуры воздуха (а), °С/год, и годовой суммы осадков (б), мм/год, по территории водосборного бассейна Обской губы за период 1980–2018 гг. на основе расчетов на региональной климатической модели WRF, определенное по наклону линии линейного тренда для каждой расчетной ячейки разрешением  $30 \times 30$  км.

#### МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как отмечено выше, расчеты на климатической модели WRF выполнялись за период с 1979 по 2018 г., чтобы оценить изменение климатических характеристик в исследуемом регионе и получить необходимые входные данные для гидрологических моделей водосбора и устьевой области. На рис. 4 представлены изменения среднегодовой температуры воздуха и осадков за период 1980–2018 гг. по данным WRF, вычисленные на основе наклона линейного тренда. Следует отметить небольшое уменьшение среднегодовой температуры воздуха ( $-0.6...-1.0^\circ\text{C}$  за весь период) в центральной части водосбора р. Оби и очень неравномерное изменение годовых осадков с тенденцией их уменьшения в западной части региона и в северной части Обской Губы и их увеличения в бассейне Иртыша и средней Оби. Такая неоднородность трендов годовых осадков на данной территории в целом объясняет незначительное увеличение стока р. Оби за этот период по

сравнению с другими крупными арктическими реками [39].

Для оценки притока речных вод в Обскую губу за период 1980–2018 гг. выполнены расчеты для всего водосборного бассейна Обской губы на модели WBM с использованием климатических данных WRF для двух вариантов – с учетом и без учета хозяйственной деятельности. В целом модель WBM достаточно надежно характеризует речной приток в Обскую губу при использовании климатических данных от WRF для небольших и средних рек и в то же время на  $\sim 25\%$  завышает сток р. Оби по сравнению с наблюдаемым (рис. 5). Смоделированные среднегодовые расходы воды Оби, однако, показывают неплохую корреляцию (0.75) с данными наблюдений. Следует отметить, что завышенный сток по модельным расчетам обусловлен, главным образом, завышенными осадками, особенно в летний период, при использовании модели WRF с граничными условиями из реанализа NCEP/NCAR. Данная проблема для реанализа NCEP/NCAR достаточно хорошо из-



**Рис. 5.** Примеры моделирования на WBM годового стока для р. Оби у г. Салехарда (а) и суточных гидрографов стока р. Надым у г. Надыма (б) с использованием метеорологической информации от региональной климатической модели WRF и их сравнение с данными наблюдений.

вестна и связана с завышением конвективных осадков над сушей в модели NCEP [37]. Поэтому для более надежной оценки стоковых характеристик смоделированные значения стока были откорректированы в соответствии с данными наблюдений на имеющихся гидрологических постах. Помимо этого, выполнены расчеты на WBM с использованием других климатических данных от реанализов MERRA2 и ERA5. Сравнительный анализ показал, что наилучшее соответствие модельных и наблюдаемых значений стока — при использовании климатических данных от реанализа MERRA2.

Помимо анализа притока речных вод в Обскую губу, по полученным расчетным данным также выполнена оценка изменений различных гидрологических характеристик по всей территории водосборного бассейна. Выявлено, что для водосбора Обской губы существует закономерность увеличения стока в восточных регионах и его уменьшения в центральной, наиболее заболоченной, части и в самой северной части в зоне многолетней мерзлоты. Это в первую очередь обусловлено изменением сумм осадков по территории водосборного бассейна (рис. 4). На основе анализа сезонных изменений речного стока выявлено, что тенденции к увеличению годового стока обусловлены, главным образом, ростом стока в осенне-зимний период, когда его основное формирование осуществляется за счет подземного питания. В то же время в северных регионах, выходящих к Северному Ледовитому океану, наблюдается уменьшение снегозапасов и стока весеннего половодья, которое, очевидно, определяется существенным повышением среднегодовой температуры воздуха (рис. 4) и уменьшением доли твердых осадков в этом регионе.

Сравнение результатов расчетов на WBM с учетом и без учета влияния хозяйственной деятельности на водосборе показало, что в низовьях

Оби у Салехарда за счет антропогенных факторов среднегодовой сток за период 1980–2018 гг. в среднем недополучал 18 км<sup>3</sup>/год, или <5% от годового стока. Все крупные водохранилища в бассейне расположены в верхнем течении Оби и на ее притоках — реках Иртыш и Тобол и построены до 1980 г. Несмотря на высокую естественную зарегулированность стока р. Оби, из-за высокой озерности и заболоченности в среднем и нижнем течении Оби регулирование стока водохранилищами привело к значимому (на 20–25%) увеличению зимнего стока Оби у Салехарда и незначительному снижению летне-осеннего стока. Влияние водохранилищ на сток весеннего половодья у г. Салехарда незначительно, так как он формируется, главным образом, за счет незарегулированной части водосбора.

Для оценки изменений климатических характеристик на водосборе Обской губы на перспективу выполнены расчеты на модели WRF, в которой граничные условия определялись глобальной Моделью Общей Циркуляции Атмосферы и Океана (МОЦАО) — CCSM (Community Climate System Model), которая участвует в проекте CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) [47]. Использование модели CCSM обусловлено тем, что данная модель наиболее детально учитывает физические процессы на территории суши, включая гидрологические, влияние растительности и промерзание почвы. Расчеты на климатической модели WRF выполнялись для базового исторического периода — с 1979 по 2005 г. — и для двух сценариев изменения концентрации парниковых газов и аэрозолей при разных вариантах изменений внешних радиационных воздействий RCP (Representative Concentration Pathways). В МОЦАО прогнозируемое для XXI в. изменение внешних параметров задается с учетом четырех сценариев антропогенных воздействий, построенных в соответствии с ожидаемым к 2100 г. пото-



**Таблица 1.** Ожидаемые изменения среднегодового стока крупных рек, впадающих в Обскую губу, для двух климатических сценариев на основе моделирования на модели WBM

Сценарий/период	р. Обь, г. Салехард		р. Надым, пос. Надым		р. Пур, г. Самбург		р. Таз, пос. Сидоровск	
	км <sup>3</sup>	%	км <sup>3</sup>	%	км <sup>3</sup>	%	км <sup>3</sup>	%
RCP4.5 (2020–2040)	–6.1	–1.5	–1.6	–11	–3.2	–11	–0.8	–2.3
RCP4.5 (2040–2060)	26.9	6.7	0	0	–1.4	–4.6	–0.2	–0.6
RCP8.5 (2020–2040)	22.9	5.7	0.3	2.4	–0.6	–2.0	1.9	5.5
RCP8.5 (2040–2060)	27.4	6.8	0.6	3.8	0.7	2.4	2.8	8.1

ком радиации на границе атмосферы – RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 (соответственно 2.6, 4.5, 6.0 и 8.5 Вт/м<sup>2</sup>). Для водосборного бассейна Обской губы рассматривались сценарии RCP 4.5, RCP 8.5. Для оценки изменения различных климатических и гидрологических характеристик в перспективе рассмотрены ожидаемые изменения к 2030 и 2050 гг. Для этого сравнивались отклонения средних значений за периоды 2020–2040 и 2040–2060 гг. от средних значений за базовый исторический период – 1971–2005 гг. Следует ожидать дальнейшего увеличения среднегодовой температуры воздуха по всей территории водосборного бассейна Обской губы в диапазоне от 1.5°C в южной части до 4.5°C в северной по сценарию RCP 8.5 к 2050 г. Годовые осадки, по данному сценарию, существенно уменьшатся в верховьях р. Оби и незначительно вырастут в северных районах, прилегающих к Обской губе.

Климатические данные на перспективу, полученные на модели WRF, были использованы для моделирования различных характеристик водного баланса по территории водосборного бассейна Обской губы и для оценки речного и теплового притока в Обскую губу с помощью расчетов на модели WBM. На рис. 6 представлены отклонения среднегодового стока от средних значений за исторический период по водосбору Обской губы для двух сценариев изменения климата – RCP 4.5, RCP 8.5. Следует отметить существенное различие тенденций изменения годового стока в зависимости от используемого климатического сценария. Наибольшее увеличение стока (>50 мм/год) ожидается в западных и центральных районах водосбора, а также на Алтае, согласно сценарию RCP 8.5, к 2050 г. Согласно сценарию RCP 4.5, к 2030 г. ожидается уменьшение стока в низовьях Оби и в бассейнах Надыма, Пура и Таза (до 30 мм/год) и его существенное увеличение в западной части бассейна Оби к 2050 г. В целом по обоим сценариям, к 2050 г. ожидается существенное увеличение речного притока в Обскую губу, главным образом за счет увеличения стока Оби (табл. 1).

Результаты модельных расчетов на WBM были использованы для оценки речного и теплового

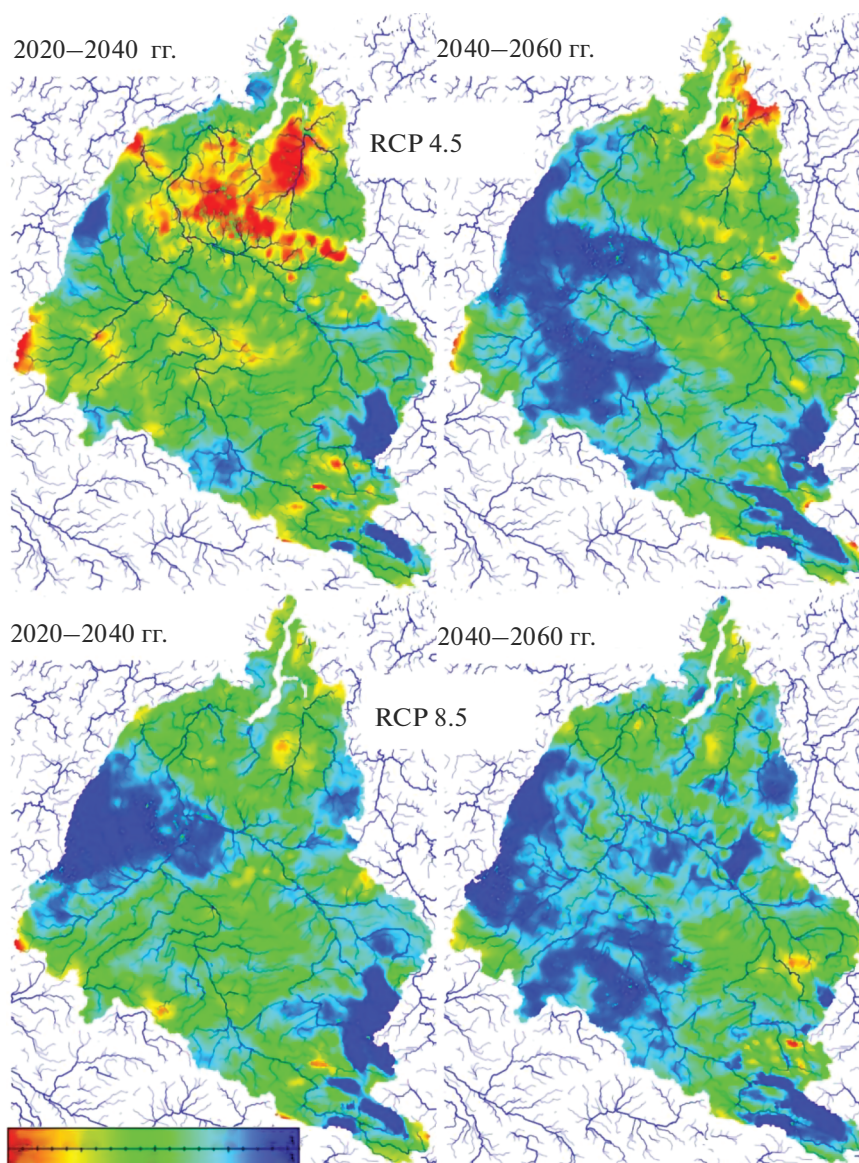
стока с территории, не охваченной регулярными наблюдениями, а также для заполнения пропусков в данных о речном стоке на замыкающих створах крупных рек.

Расчеты гидрологических процессов в Обской губе за период 1980–2018 гг. на трехмерной гидродинамической модели с использованием результатов расчетов на WRF и WBM показали следующие результаты.

Моделирование уровня поверхности, обусловленной речным стоком, демонстрирует закономерную картину понижения уровня вдоль губы от морского края дельты к выходу в море и в целом согласуется с данными береговых наблюдений, несмотря на их “ненадлежащее качество” [4]. Моделирование показывает наличие поперечных денивилляций уровня, обусловленных силой Кориолиса. Разница между уровнями у правого и левого берегов в среднем по губе в летний период составляет ~2 см, в зимний период ~0.5 см. Что касается многолетних изменений уровня воды, то сопоставить данные моделирования и данные наблюдений сложно. Как показано в работе [4], “принимая во внимание состояние высотной основы постов в Обской и Тазовской губах и не вполне надежное качество данных по уровням, сложно, а вернее невозможно, делать выводы о точной величине их многолетнего изменения”.

По данным моделирования, многолетние изменения уровня воды практически по всей губе незначимы. Многолетние изменения уровня воды заметны лишь в районах впадения крупных рек и остаются статистически незначимыми: у впадения Оби уровень повышается, у впадения Надыма, Пура и Таза понижается.

Сравнение полей уровня, моделируемых при задании фактического гидрографа стока р. Оби и при задании стока, рассчитанного на WBM без учета влияния хозяйственной деятельности, показали несущественное (менее точности измерения уровня воды на береговых постах – 1 см) влияние хозяйственной деятельности в бассейне Оби на уровень воды в Обской губе. При этом сезонное перераспределение стока действующими ГЭС приводит к некоторому (до 4 мм) уменьше-

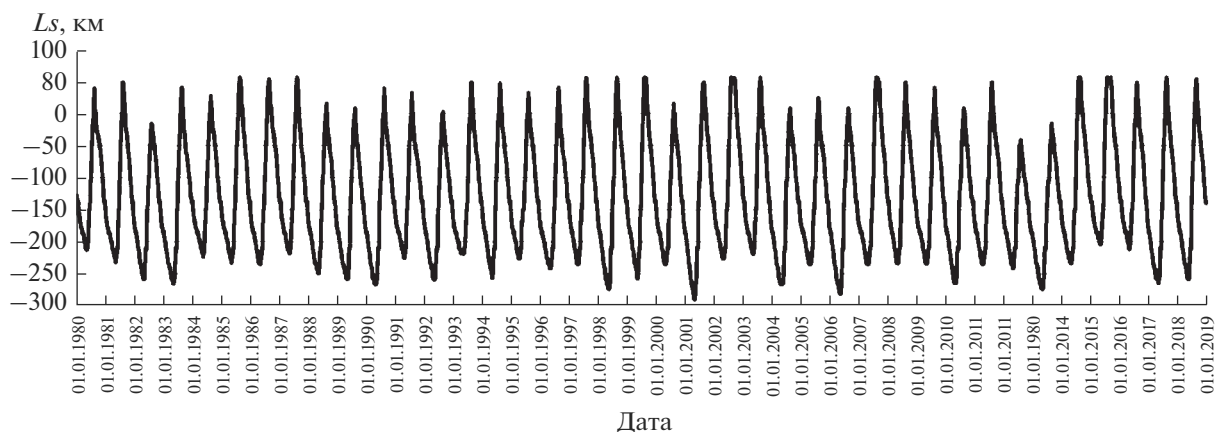


**Рис. 6.** Ожидаемое изменение среднего слоя стока, мм, на уровень 2030 г. и 2050 г., рассчитанное на WBM для двух климатических сценариев RCP 4.5, RCP 8.5.

нию уровня в летний период практически по всей акватории губы, за исключением зоны нахождения гидрофронта севернее Тамбея, где моделируется небольшое увеличение уровня (до 3 мм). В зимний период перераспределение речного стока на зимние месяцы привело к увеличению уровня воды по всей губе. Наибольшее влияние этого перераспределения моделируется у морского края дельты, далее по мере продвижения к морю это влияние резко уменьшается и в северной части практически не прослеживается.

Общий недостаток имеющихся наблюдений за течениями в Обской губе — их разрозненность по времени и охват случайных ситуаций. Однако из них можно получить общее представление о ха-

рактере течений в губе [9]. Течения на акватории северной части Обской губы представляют собой векторную сумму стоковой, сгонно-нагонной, плотностной и периодической приливо-отливной составляющих скоростей течения. Если на основе разрозненных натуральных данных диапазоны изменения приливных и синоптических скоростей определены, то стоковые составляющие скоростей менее значительны и поэтому труднее выделяются из измеренных суммарных скоростей. Максимальные значения стоковых скоростей бывают на пиках половодий, но измерения в этот период (при разрушающемся ледяном покрове) не проводятся. В связи с этим диапазон стоковых составляющих скоростей можно оце-



**Рис. 7.** Рассчитанная дальность интрузии морских вод (по солёности 1‰ у дна) в Обскую губу за период 1980–2018 гг. За ноль километража принят траверз п. Тамбей.

нить только по расчетам на гидродинамической модели. По данным моделирования в период прохождения волны половодья, стоковая составляющая скорости составляет  $\sim 0.8$  м/с у речной границы расчетной области и быстро уменьшается на взморье, составляя на траверзе м. Ям-Сале уже максимум – 0.3 м/с. Далее до выхода в море стоковая составляющая скорости потока может достигать на отдельных участках 0.2 м/с. В период зимней межени стоковая составляющая скорости имеет максимальные значения у речной границы и в районе нахождения галоклина из-за уменьшения поперечного сечения потока, достигая 0.1 м/с. Плотностные течения, обуславливающие заток морских вод в губу, в период увеличенных градиентов плотности после спада половодья могут достигать 0.3 м/с, но обычно имеют значения до 0.05 м/с.

Моделирование показало отсутствие существенных многолетних изменений стоковой скорости течения по всей акватории Обской губы. Однако эти незначительные изменения могут накапливаться и проявляться в существенном изменении других гидрологических характеристик, главным образом в развитии интрузии морских вод в губу, определяющейся соотношением стоковой и плотностной составляющих скорости.

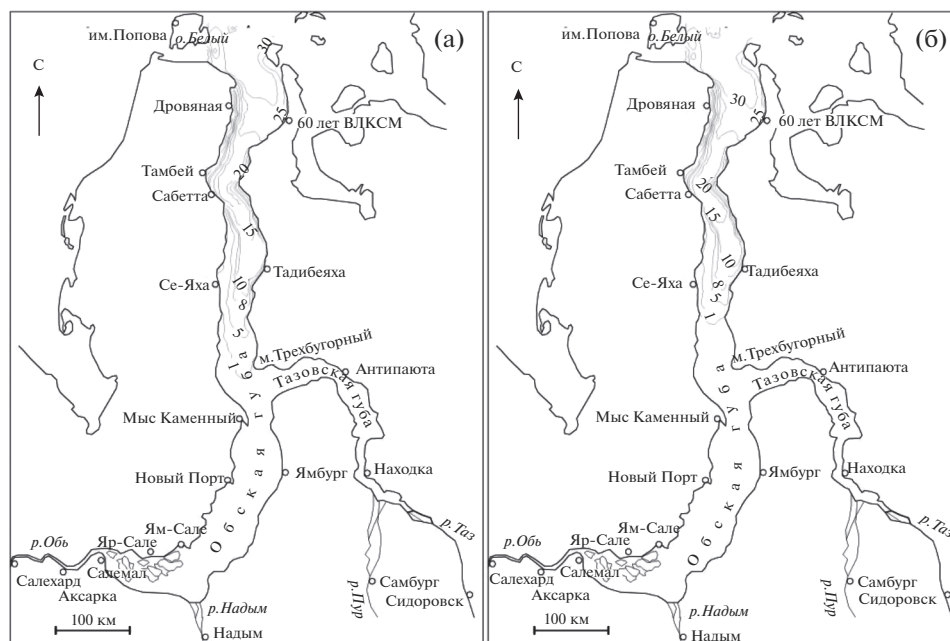
Важная характеристика, отражающая суммарное изменение гидрологических полей в устьевой области под влиянием внешних факторов, — дальность интрузии морских вод  $L_s$ .  $L_s$  в Обскую губу, рассчитанная за период 1980–2018 гг., показана на рис. 7. Диапазон сезонной изменчивости  $L_s$  за этот период составил 350 км.

Максимальная  $L_s$  обычно достигается весной, к концу апреля. Межгодовая изменчивость максимальной  $L_s$  находится в диапазоне от 204 до 290 км южнее от траверза пос. Тамбей и не имеет значимого тренда. Максимальная  $L_s$  в годовом

цикле в основном зависит от водности предшествующего периода с августа по апрель. Как правило, сильному проникновению морских вод в губу предшествует период с пониженным речным стоком. Кроме этого, имеет значение и начальное положение гидрофронта после прохождения волны половодья, которое также определяется главным образом объемом половодья. Вносят свой вклад в продвижение гидрофронта и характеристики ледового покрова, который уменьшает площадь поперечного сечения потока, увеличивая стоковую составляющую скорости. Все эти факторы формируют достаточно сложную картину динамики гидрофронта. Так, при максимальном развитии интрузии, которое моделировалось в 2001 г. (рис. 8а), предшествующий период с августа по апрель не был самым маловодным за исследуемый период, а при минимальном развитии интрузии, моделируемом в 2015 г. (рис. 8б), предшествующий период не был самым многоводным. Это говорит о том, что для такого сложного объекта, как Обская губа, моделирование отдельных лет может не дать желаемого результата для выявления экстремальных гидрологических ситуаций [2, 6, 20], необходимо проведение модельных расчетов за несколько лет.

Максимальный вынос морских вод из устьевой области под действием половодной волны также претерпевает межгодовую изменчивость с размахом  $\sim 100$  км и также не имеет значимого тренда. При этом, как правило, гидрофронт отступает севернее Тамбея в среднем на 35 км. В 2012 и 2013 гг. вследствие аномально низкого стока р. Оби соленые воды на придонном горизонте оставались южнее Тамбея, что подтверждается данными наблюдений [19].

Моделирование с гидрографом стока р. Оби, рассчитанным без учета влияния хозяйственной деятельности в бассейне реки, показало, что без



**Рис. 8.** Распределение солёности на донном горизонте Обской губы в весенний период, ‰, при максимальном развитии интрузии морских вод (2001 г.) (а) и при минимальном развитии интрузии морских вод (2015 г.) (б) по данным моделирования при задании фактического стока р. Оби.

регулирования стока водохранилищами моделируется несколько меньший максимальный заток морских вод (до 17 км), максимальный вынос морских вод моделируется примерно в тех же пределах, что и с наблюдаемым стоком, а наклоны линий линейного тренда изменения максимальной дальности залива и дальности выноса морских вод меняют знак (табл. 2). Это говорит о том, что хозяйственная деятельность в бассейне реки в некоторой степени компенсирует изменения, обусловленные природными факторами.

Основные закономерности изменения температуры воды в районе нахождения гидрофронта в целом повторяют закономерности изменения солёности воды. Интегральным показателем изменения температурных характеристик Обской гу-

бы под влиянием изменения речного стока могут служить связанные с ними изменения ледовых характеристик.

Моделируемый процесс появления льда согласуется с принципиальной схемой замерзания Обской губы, полученной по данным ледовых авиаразведок 1970-х и 1980-х гг. и данным наблюдений на береговой сети: сперва замерзает часть губы севернее Тамбея, мелководные районы южной части Обской губы и Тазовская губа, а также прибрежные мелководные участки, в последнюю очередь замерзает центральная часть губы [1, 4, 12, 13].

По результатам обработки данных стационарной морской береговой сети в Карском море за

**Таблица 2.** Характеристики интрузии морских вод в Обской губе по данным моделирования за период 1980–2018 гг.

Граничные условия характеристика интрузии	Наблюдаемый сток		Расчитанный сток без учета водохранилищ	
	максимальный заток*	максимальный вынос*	максимальный заток*	максимальный вынос*
Наибольшее, км	-290	-41.6	-274	-40.8
Наименьшее, км	-204	56	-194	56
Размах, км	86	98	80	96.8
Среднее, км	-243	35	-236	34
Наклон линии линейного тренда, км/год	-0.14	0.03	0.07	-0.07

\* от траверза п. Тамбей “-” в сторону реки, “+” в сторону моря.



последние 30 лет сроки появления льда имеют тенденцию к смещению в сторону поздних сроков на 3–4 сут, а в XX в. сдвиг составил 7–10 сут, сроки очищения ото льда, по данным наблюдений в Карском море, имеют тенденцию к смещению в сторону ранних сроков до 5 сут, а в XX в. сдвиг составил 5–12 сут [7]. Результаты расчетов на период 1980–2018 гг. демонстрируют похожую ситуацию для Обской губы. В среднем моделируется сдвиг дат появления льда на 5 сут в сторону поздних сроков за моделируемый период. При этом наиболее существенные сдвиги происходят в центральной части губы от м. Трехбугорный до Тамбея, где в районах, удаленных от берега, моделируется сдвиг до 16 сут за исследуемый период. В среднем моделируется сдвиг дат очищения ото льда на 11 сут в сторону ранних сроков за моделируемый период. При этом наиболее существенные сдвиги происходят в северной части губы. Вклад речного стока в долгопериодные изменения дат наступления ледовых фаз незначителен. В основном изменения происходят под действием атмосферных факторов.

Влияние хозяйственной деятельности в бассейне реки на сроки наступления ледовых фаз незначительно. Моделирование с речным стоком, рассчитанном без учета влияния водохранилищ, демонстрирует смещение на 0.5 сут даты очищения ото льда на поздние сроки у западного берега центральной части губы. Даты появления льда при восстановленном стоке смещаются на ранние сроки на 0.5 сут в отдельных районах северной части губы, что связано с изменениями стратификации водной массы, влияющей на глубину конвекции в период выхолаживания перед образованием льда.

Многолетние изменения толщины льда к 1 мая, по данным моделирования, показывают, что происходят разнонаправленные процессы: в Тазовской губе и частично в южной части Обской губы моделируется тенденция уменьшения толщины льда (до –6 мм/год), в северной части Обской губы моделируется тенденция увеличения толщины льда (до 4 мм/год). Антропогенная деятельность в бассейне реки привела к небольшому уменьшению средней толщины льда к 1 мая практически по всей акватории губы, за исключением самой северной части в районе морского бара, наиболее сильное уменьшение смоделировано у западного берега центральной части губы – в среднем на 3 см.

По результатам оценок составлена схема районирования Обской губы по степени влияния внешних природных и антропогенных факторов, действующих на водосборе реки, на устьевые процессы в Обской губе за исторический период (рис. 9).



**Рис. 9.** Картограмма районирования Обской губы по влиянию внешних природных и антропогенных факторов, действующих на водосборе реки, на гидрологические устьевые процессы за исторический период. 1 – районы межгодовой изменчивости сезонных положений фронтальной зоны; 2 – район изменения предельного положения фронтальной зоны под воздействием хозяйственной деятельности в бассейне реки, 3 – район наибольшего влияния хозяйственной деятельности в бассейне реки на толщину льда.

## ОЦЕНКА МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДОВО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПЕРСПЕКТИВУ

Моделирование гидрологических процессов в Обской губе с входными данными, соответствующими различным климатическим сценариям, показывает ряд возможных существенных изменений в гидрологических процессах в губе.

Уровень воды в губе меняется соответственно изменению стока рек, и основные его изменения моделируются в местах впадения рек, при удалении от которых изменения очень быстро перестают быть существенными.

Размах колебаний характеристик интрузии значительно увеличен по сравнению со смоделированным за исторический период (табл. 3). Максимальный заток морских вод в среднем уменьшился для сценария RCP4.5 на 22 км, для сценария RCP8.5 на 30 км. Размах колебаний максимального затока морских вод для сценария RCP4.5 больше исторической изменчивости этого параметра на 16 км, для сценария RCP8.5 – на 22 км. Изменчивость максимального выноса морских вод моделируется с большим размахом, чем за ис-



**Таблица 3.** Характеристики интрузии морских вод в Обской губе по данным моделирования за период 2021–2065 гг.

Граничные условия	RCP4.5		RCP8.5	
	максимальный заток*	максимальный вынос*	максимальный заток*	максимальный вынос*
Наибольшее, км	–266	–96	–282	20.8
Наименьшее, км	–164	150	–174	160
Размах, км	102	246	108	139
Среднее, км	–221	99	–213	112

\* От траверза п. Тамбей “–” в сторону реки, “+” в сторону моря.

торический период, для сценария RCP4.5 в 2.5 раза, для сценария RCP8.5 в 1.5 раза. В среднем максимальный вынос морских вод моделируется больше на 65–77 км.

Таким образом, характеристики интрузии морских вод, смоделированные для условий различных климатических сценариев, выходят за пределы их природной изменчивости. Для летнего периода при в среднем более пресном эстуарии могут выдаваться годы с пониженным стоком, когда соленая вода задерживается гораздо южнее ее экстремального расположения в исторический период. Для зимнего периода положение гидрофронта моделируется несколько севернее, чем при моделировании за исторический период (до 40 км); т. е. при реализации рассмотренных сценариев вследствие изменения речного стока вода в эстуарии становится в целом более пресной.

Моделирование для различных климатических сценариев показало, что изменение дат наступления ледовых фаз относительно современного состояния Обской губы связано в основном с атмосферными факторами и сменой относительно теплого современного периода на более холодный период в будущем. Влияние на ледовые фазы атмосферных факторов гораздо более значительное, чем влияние изменений речного стока под воздействием климатических изменений на водосборе реки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование формирования стока на модели WBM показало неоднородные изменения годового стока по территории водосбора Обской губы за период 1980–2018 гг. Есть тенденция к увеличению годового стока в восточной части бассейна и в нижнем течении Оби, которая в целом соответствует изменению годовых осадков. Анализ сезонного стока и компонентов его формирования показал, что данное увеличение годового стока обусловлено его ростом в осенне-зимний период, когда формирование стока в основном осуществляется за счет подземного питания. Модельные расчеты показали, что влияние хо-

зяйственной деятельности в бассейне реки привели к значимому (на 20–25%) увеличению зимнего стока р. Оби у Салехарда и незначительному снижению летне-осеннего стока. Оценки будущих изменений стока к 2050 г. на основе климатических сценариев RCP 4.5, RCP 8.5 показали, что ожидается существенное увеличение речного притока в Обскую губу, главным образом за счет увеличения стока Оби до 6.8%. В то же время сток других крупных рек, впадающих в Обскую губу, увеличится от 2.4% для р. Пур до 8.1% для р. Таз.

Результаты применения каскада моделей показали, что долгопериодные природные и антропогенные изменения на водосборе реки к настоящему времени не приводят к существенным однонаправленным изменениям в гидрологических полях в Обской губе.

Одновременно можно сделать очень важный вывод, что данные комплексных гидрологических съемок, проведенных в 1970–1980 гг., могут служить основой для оценки влияния уже построенных в настоящее время подходящих каналов на гидрологические поля в Обской губе. Поскольку комплексных наблюдений за сезонными гидрологическими характеристиками в Обской губе непосредственно перед проведением дноуглубительных работ не проводилось, для сравнения современного состояния губы с состоянием губы до строительства каналов могут быть использованы данные 1970–1980 гг.

Моделирование сезонной динамики гидрологических полей в Обской губе только с одним изменяющимся фактором – речным стоком – показало, что для исследования предельных состояний системы недостаточно воспроизведения сезонного хода гидрологических процессов в течение только одного года с экстремальными характеристиками стока, необходимо моделирование ряда лет.

Расчеты на перспективу показали, что изменения на водосборе, приводящие к увеличению речного стока, будут способствовать меньшему проникновению соленых вод в губу в зимний период и большему выносу гидрофронта в сторону моря в летний период.

Предлагаемый методологический подход с использованием данных наблюдений и мультимодельных экспериментов может быть в дальнейшем использован для изучения сезонных гидрологических процессов других устьевых областей, окраинных морей и океана в целом и может быть расширен включением гидрохимических и биотических процессов.

Благодарим Национальный фонд науки США за полученные данные для валидации моделей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агафонова С.А.* Ледовый режим рек арктической зоны Западной Сибири в современных климатических условиях // *Арктика и Антарктика*. 2017. № 2. С. 25–33. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.2.22649>
2. *Архипов Б.В., Алабян А.М., Дмитриева А.А. и др.* Моделирование влияния морского канала к порту Сабетта на гидродинамический режим и соленость Обской губы // *ГеоРиск*. Т. XII. № 1. 2018. С. 46–58.
3. *Введенский А.Р., Дианский Н.А., Кабатченко И.М., Литвиненко Г.И., Резников М.В., Фомин В.В.* Расчет и анализ ожидаемого воздействия гидротехнического сооружения на экологическую обстановку и донную топографию акватории при строительстве подходного канала к порту Сабетта // *Вестн. МГСУ*. 2017. Т. 12. Вып. 5 (104). С. 480–489. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.5.480-489>
4. *Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А. и др.* Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура воды) / Под ред. *Г.Н. Войнова*. СПб., 2017. 192 с.
5. *Волкова Д.Д., Третьяков М.В., Шикломанов А.И.* Использование модели WBM для оценки речного стока с водосбора Обско-Тазовской устьевой области // *Тез. докл. Международ. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2020”*. Севастополь: Фил. МГУ, 2020. С. 31–32.
6. *Дианский Н.А., Фомин В.В., Грузинов В.М. и др.* Оценка влияния подходного канала к порту Сабетта на изменение гидрологических условий Обской губы с помощью численного моделирования // *Арктика: экология и экономика*. 2015. № 3 (19). С. 18–29.
7. *Думанская И.О.* Долгосрочный прогноз ледовых характеристик морей европейской части России и их изменения на рубеже XX–XXI веков // *Тр. Гидрометцентра России*. 2013. Вып. 350. С. 110–141.
8. *Дюсебаева З.* Влияние антропогенных факторов на изменение стока реки Иртыш. М.: LAP LAMBERT Acad. Publ. 2012. 84 с. ISBN 9783659283116
9. *Иванова А.А.* Течения и массоперенос на устьевом взморье Оби. Комплексные исследования и изыскания ледовых и гидрометеорологических явлений и процессов на Арктическом шельфе // *Тр. ААНИИ*. 2004. Т. 449. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. С. 327–330.
10. *Калинин Г.П., Милоков П.И.* Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // *Тр. ЦИП*. Вып. 66. 1958. 72 с.
11. *Михайлов В.Н.* Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с.
12. *Налимов Ю.В., Усанкина Г.Е., Балабаев А.П.* Ледово-гидрологический режим в губах и заливах шельфа Карского моря. Комплексные исследования и изыскания ледовых и гидрометеорологических явлений и процессов на Арктическом шельфе // *Тр. ААНИИ*. 2004. Т. 449. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. С. 299–306.
13. *Налимов Ю.В., Усанкина Г.Е., Балабаев А.П.* Характеристики процесса очищения ото льда эстуариев бассейна Карского моря. Комплексные исследования и изыскания ледовых и гидрометеорологических явлений и процессов на Арктическом шельфе // *Тр. ААНИИ*. 2004. Т. 449. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. С. 290–298.
14. Свид. гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020611779. Российская Федерация. Модель трансформации речного стока. № 2020610177. Заявление. 13.01.2020. 10.02.2020. М.В. Третьяков.
15. *Соколовский Д.Л., Шикломанов И.А.* Расчеты гидрографов паводков с использованием электронных моделирующих устройств // *Тр. ЛГМИ*. 1965. Вып. 23. С. 65–79.
16. Стратегия социально-экономического развития Ямало-Ненецкого автономного округа на период до 2035 года. Утв. Постановлением Законодательного собрания Ямало-Ненецкого АО 24 июня 2021 г. № 478.
17. *Третьяков М.В.* К моделированию гидрологических процессов в эстуариях с ледовым покровом // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008. № 2 (79). С. 67–74
18. *Третьяков М.В., Иванов В.В.* Состояние и проблемы развития технологий оценки и прогнозирования интрузии морских вод в устьевые области рек Арктики в условиях регулирования стока и климатических изменений // *Тр. ГОИН*. Вып. 214. 2013. С. 200–212
19. *Третьяков М.В., Румянцева Е.В., Брызгалов В.А. и др.* Пространственно-временная изменчивость гидрохимических показателей водной среды Обской и Тазовской губ // *Арктика: экология и экономика*. 2022. Т. 12. № 1. С. 4–55. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-1-44-55>
20. *Чанцев В.Ю., Данышина А.В.* Расчет внутригодовой динамики гидрофизического режима Обской губы с высоким пространственным разрешением // *Фундаментал. приклад. гидрофизика*. 2019. Т. 12. № 3. С. 55–64.
21. *Baryshnikov G., Novoselov D.* Problems of transboundary rivers of Asian border zone of Russia // *Pskov Region Studies J.* 2019. Iss. 2 (38). P. 78–85. <https://prj.pskgu.ru/s221979310012059-7-1/> (дата обращения: 15.12.2021) <https://doi.org/10.37490/S221979310012059-7>
22. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // *Three-Dimensional Coastal Ocean Models* / Ed. *N. Heaps*. Washington, D.C.: Am. Geophys. Union, 1987. P. 208.
23. *Cai L., Alexeev V.A., Arp C. D., Jones B.M., Liljedahl A.K., Gädeke A.* The Polar WRF downscaled historical and

- projected twenty-first century climate for the coast and foothills of Arctic Alaska *Front // Earth Sci.* 2018. № 5. P. 1–15.
24. Grogan D.S., Wisser D., Prusevich A., Lammers R.B., Frolking S. The use and re-use of unsustainable groundwater for irrigation // *A global budget. Environ. Res. Lett.* 2017. № 12 (3). P. 34–51.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5fb2>
  25. Grogan D.S., Zhang F., Prusevich A., Lammers R.B., Wisser D., Glidden S., Li C., Frolking S. Quantifying the link between crop production and mined groundwater irrigation in China // *Sci. Total Environ.* 2015. № 511. P. 161–175.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.076>
  26. Hines K.D., Bromwich L., Ba L., Barlage M.J., Slater A.G. Development and testing of polar WRF.art III. Arctic land // *J. Climate.* 2011. № 24. P. 26–48.  
<https://doi.org/10.1175/2010JCLI3460.1>
  27. Holmes R.M., Shiklomanov A.I., Suslova A., Tretiakov M., McClelland J.W., Scott L., Spencer R.G.M., Tank S.E. River discharge in “State of the Climate in 2020”. Chapter 5. “Arctic” // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2021. № 102 (8). S290–S293.  
<https://doi.org/10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1>
  28. Huss M., Hock R. A new model for global glacier change and sea-level rise // *Frontiers Earth Sci.* 2015. V. 3. № 54. P. 54–72.  
<https://doi.org/10.3389/feart.2015.00054>
  29. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996. V. 77. № 3. P. 437–471.
  30. Lammers R.B., Pundsack J.W., Shiklomanov A.I. Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2007. № 112. P. 1–15. G04S59.  
<https://doi.org/10.1029/2006JG000370>
  31. Motovilov Y.G., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations // *Agric. For. Meteorol.* 1999. № 98. P. 257–277.
  32. Powers J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C., Davis C.A., Dudhia J., Gil, D.O. et al. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2017. № 98. P. 1717–1737.  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
  33. Rawlins M.A. Increasing freshwater and dissolved organic carbon flows to Northwest Alaska’s Elson lagoon // *Environ. Res. Lett.* 2021. № 16. P. 105014.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2288>
  34. Romanovsky V. et al. Changing permafrost and its impacts // *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme.* 2017. P. 65–102.
  35. Rounce D.R., Hock R., Shean D.E. Glacier Mass Change in High Mountain Asia Through 2100 Using the Open-Source Python Glacier Evolution Model (PyGEM) // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 7 (331). P. 331–351.  
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00331>
  36. Saito K., Walsh J., Bring A., Brown R., Shiklomanov A., Yang D. Future Trajectory of Arctic System Evolution // *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems. Cham: Springer Nature,* 2021. P. 893–914.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9_30)
  37. Serreze Mark C., Hurst Ciaran M. Representation of Mean Arctic Precipitation from NCEP–NCAR and ERA Reanalyses // *J. Climate.* 2000. № 13 (1). P. 182–201.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0182:romapf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0182:romapf>2.0.co;2)
  38. Shiklomanov A.I., Lammers R.B. River ice responses to a warming Arctic—recent evidence from Russian rivers // *Environ. Res. Lett.* 2014. V. 9. P. 035008.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035008>
  39. Shiklomanov A.I., Déry S.J., Tretiakov M.V., Yang D., Magritsky D., Georgiadi A., Tang W. River freshwater flux to the Arctic Ocean in Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystem. Dordrecht: Springer, 2021. P. 703–738.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9>
  40. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D., Polischuk Yu., Savichev O., Smith L.C., Chernokulsky A.V. Hydrological changes: historical analysis, contemporary status and future projections. // *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences.* Chapter 4. Dordrecht: Springer, 2013. P. 111–155.
  41. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF. Version 3. NCAR Technical Note 475. 2008. 113 p.
  42. Smith S.L., Romanovsky V.E., Isaksen K., Nyland K.E., Kholodov A.L., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Farquharson L.M., Drozdov D.S., Malkova G.V., Christiansen H.H. Permafrost in “State of the Climate in 2020”, Chapter 5, “Arctic” // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2021. № 102 (8). S293–S297.  
<https://doi.org/10.1175/2021BAMSStateoftheClimate>
  43. Smith L.C., Pavelsky T.M., MacDonald G.M., Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Rising minimum flows in northern Eurasian rivers suggest a growing influence of groundwater in the high-latitude water cycle // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. G04–S47.  
<https://doi.org/10.1029/2006JG000327>
  44. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic lakes // *Sci.* 2005. V. 308. Iss. 5727. P. 1429.
  45. Stewart R.J., Wollheim W.M., Miara A., Vörösmarty C.J., Fekete B., Lammers R.B., Rosenzweig B. Horizontal Cooling Towers: Riverine Ecosystem Services and the Fate of Thermoelectric Heat in the Contemporary Northeast U.S. // *Environ. Res. Lett.* 2013. № 8: 025010. P. 25–35.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/025010>
  46. Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River Basin // *Northern Eurasia Geophys. Res. Lett.* 2016. № 43. P. 764–775.
  47. Taylor K.E., Stouffer J.R., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and experiment design. *Bull. // Am. Meteorol. Soc.* 2012. V. 93. Iss. 4. P. 485–498.
  48. URL: <https://neespi.sr.unh.edu/>

49. *Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A.* An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system // *Hydrol. Processes*. 2011. № 25. P. 1055–1073. <https://doi.org/10.1002/hyp.7901>
50. *Wisser D., Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Schumann A.H.* Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network – Hydrology (GTN-H) // *Hydrol. Earth System Sci.* 2010. V. 14. P. 1–24.
51. *Yang D., Park H., Prowse T., Shiklomanov A., McLeod E.* River Ice Processes and Changes Across the Northern Regions. *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems* / Ed. *D.L. Kane, K.M. Hinkel* // Springer Int. Publ. 2021. P. 379–406. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9_13)
52. *Zaveri E., Grogan D.S., Fisher-Vanden K., Frolking S., Lammers R.B., Wrenn D.H., Prusevich A., Nicholas R.E.* Invisible water, visible impact: Groundwater use and Indian agriculture under climate change // *Environ. Res. Lett.* 2016. V. 11 (8). P. 84–96.
53. *Zuidema S., Grogan D., Prusevich A., Lammers R., Gilmore S., Williams P.* Interplay of changing irrigation technologies and water reuse: example from the upper Snake River basin, Idaho, USA // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020. № 24. P. 5231–5249. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5231-2020>