

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСТЬЯХ РЕК СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ПРИ ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА¹

© 2025 г. И. Н. Крыленко^{a, b, *}, С. В. Лебедева^c, Е. Д. Панченко^{a, b}, А. М. Алабян^{a, b}

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет,
Москва, 19991 Россия

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^cГосударственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, 199053 Россия

*e-mail: krylenko_i@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2023 г.

После доработки 10.08.2024 г.

Принята к публикации 11.08.2024 г.

Рассмотрены возможные сценарии влияния изменений климата на гидродинамические процессы в устьях Северной Двины, Онеги и Печоры. Для этого использовались ранее разработанные авторами в программных комплексах STREAM 2D, HEC-RAS и Delft3D гидродинамические модели устьевых областей, для которых в качестве нижнего граничного условия задавались различные варианты изменений уровня моря, полученные по данным глобальных климатических моделей GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES, MIROC-ESM-CHEM. При этом в качестве верхнего граничного условия задавались расходы воды в замыкающих створах речных бассейнов, рассчитанные по модели формирования стока ECOMAG для условий изменившегося климата по данным тех же климатических моделей. На основе ансамблевых расчетов выявлены и проанализированы две основные тенденции изменения факторов гидродинамики устьевых областей – рост уровня моря и снижение речного стока. Промоделированы сценарии весеннего половодья и летне-осенней межени, соответствующие разным сочетаниям граничных условий для исторического периода, а также для наиболее вероятных и наиболее неблагоприятных гидрометеорологических условий середины XXI в. Представлен анализ возможных изменений гидродинамических характеристик водного потока и их влияния на различные аспекты гидроэкологической безопасности и использования водных ресурсов устьевых областей исследуемых рек.

Ключевые слова: устья, численное моделирование, гидродинамика, затопление, изменения климата, формирование стока, ECOMAG, STREAM 2D.

DOI: 10.31857/S0321059625010042 **EDN:** UYRXMR

ВВЕДЕНИЕ

Исследования гидродинамических процессов в устьях рек, представляющие сами по себе сложную задачу [1, 14], особенно в условиях нехватки натурных наблюдений, еще более усложняются при необходимости учета возможных климатических изменений. Ввиду климатической повестки наиболее остро звучат проблемы, связанные с ростом уровня моря [38, 34], что может привести к опасному росту уровней воды в пределах

речных дельт и увеличению продолжительности их затопления. Кроме того, может увеличиться дальность проникновения приливных течений и интрузии соленых вод в русла рек [23, 24, 28], которая может существенно меняться в зависимости от фазы водного режима реки и ветровых нагонов с моря [27, 30, 33]. Таким образом, помимо изменений уровня моря, существенные факторы, которые необходимо учитывать при оценках влияния климата на гидродинамические процессы в речных устьях, – изменения стока и его внутригодового распределения.

Разные сочетания изменений двух основных факторов – уровня моря и речного стока – определяют возможные варианты трансформации гидродинамического режима устьевых областей,

¹ Работа выполнена в рамках госзадания географического факультета МГУ, раздел 1.10 (тема ЦИТИС 121051400038-1) – модельные расчеты, раздел 1.13 (тема ЦИТИС 121051100166-4) – дискуссия; Института водных проблем РАН (тема FMWZ-2025-0003) – оценка изменений характеристик затопления на период климатического прогноза. Оценка изменений стока Печоры выполнена при поддержке РНФ (проект 24-17-00084).

который, в свою очередь, обуславливает особенности термических, гидрохимических и гидробиологических процессов при взаимодействии речных и морских вод.

Исследователи отмечают, что трансформация различных процессов в устьях под влиянием изменений климата может проявляться по-разному в разных природных условиях в зависимости от определяющих факторов [21]. При этом, несмотря на большое количество исследований по возможному влиянию изменений климата на речные дельты, до сих пор наименее охваченными в подобных работах остаются арктические регионы. Например, в детальном обзоре влияния изменений климата на 49 крупных речных дельт [34] из северных рек включена только р. Маккензи. В исследованиях [26, 36] в дополнение к дельте р. Маккензи рассмотрена дельта р. Лены, а в работе [18] приведены оценки возможного влияния изменений климата на устьевую область Оби.

Отсутствие аналогичных оценок для устьев крупных рек севера Европейской территории России (ЕТР) обуславливает актуальность проводимых авторами исследований. Цель данной статьи – оценка возможных изменений основных гидродинамических характеристик в устьях крупнейших рек севера ЕТР – Северной Двины, Онеги и Печоры при ожидаемых изменениях климата.

Основой для расчетов были разработанные авторами на основе программного комплекса STREAM 2D [3] гидродинамические модели устьевых областей Северной Двины [9, 10, 19] и Печоры [7], а также одномерная и двумерная модели устьевой области Онеги [32], реализованные с использованием программных комплексов HEC-RAS [22] и Delft3D [25]. Основой для разработки сценариев гидродинамического моделирования послужили результаты климатического прогноза на середину XXI в. (2036–2065 гг.) в отношении изменения двух основных факторов – уровня моря (по данным глобальных климатических моделей GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES, MIROC-ESM-CHEM) и изменений речного стока, полученных в результате расчетов по модели формирования

стока ECOMAG [15] на основе данных этих же климатических моделей.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бассейны рек Онеги, Северной Двины и Печоры расположены в северной и северо-восточной частях ЕТР и относятся к бассейну Северного Ледовитого океана, занимают в сумме площадь, равную 737 900 км² (56 900, 357 000 и 324 000 км² соответственно) [16]. Онега и Северная Двина впадают в Белое море, Печора – в Баренцево море (рис. 1).

Устьевая область Северной Двины относится к типу приливного устья с многорукавной дельтой и приглубым устьевым взморьем, занимающим вершину Двинского залива. Общепринятой речной границей устьевого участка реки считается устье Пинеги, расположенное в 135 км от морского края дельты. Однако на этом расстоянии еще прослеживаются приливные колебания уровней воды в меженьный период, поэтому речной границей может считаться с. Орлецы [12], где заканчивается переуглубленный участок русла. В дельте Северной Двины выделяются три основных рукава – Никольский, Мурманский и Корабельный и две крупные протоки – Кузнечиха и Маймакса. Вершина дельты находится в центре г. Архангельска, в истоке Никольского рукава. Площадь дельты ~900 км². На морском крае дельты наблюдаются правильные полусуточные приливы величиной от 0.7 м в квадратуру до 1.5 м в сизигию [12]; при речных расходах ≤ 1000 м³/с приливы распространяются до гидрологического поста (г/п) с. Усть-Пинега, который находится в 137 км выше устьевого створа, ниже впадения р. Пинеги. Площадь водосбора Северной Двины составляет 348 000 км², средний годовой расход воды – 3250 м³/с (табл. 1).

Характерная особенность периода наблюдений с начала XXI в. в вершине дельты Северной Двины (г.п. Смольный Буян) – участвовавшие ситуации, когда максимальный нагонный уровень превышает максимальный уровень весеннего половодья. В вершине устьевой области сгонно-нагонные явления не оказывают значительного воздействия на формирование максимальных уровней воды. Отмечается тенденция

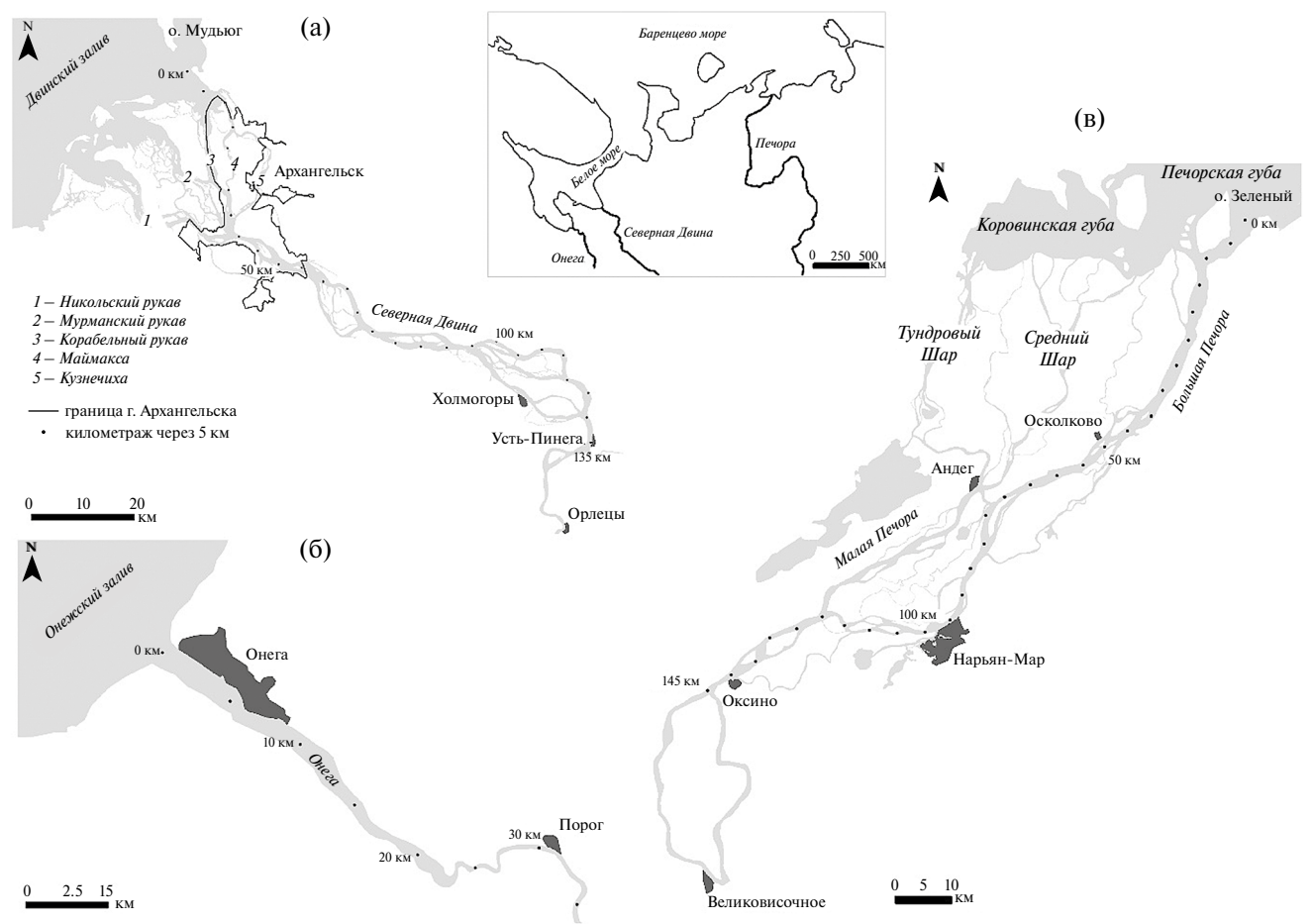


Рис. 1. Картосхема исследуемых устьевых областей Северной Двины (а), Онеги (б) и Печоры (в).

Таблица 1. Основные сведения об исследуемых устьевых областях

Характеристика	р. Северная Двина	р. Онега	р. Печора
Длина реки, км	744	416	1805
Расходный гидрологический пост в замыкающем створе	с. Усть-Пинега	с. Порог	с. Оксино
Площадь водосбора до замыкающего створа, км ²	348000	55700	312000
Средний годовой расход воды, м ³ /с	3250	507	4400
Средний максимальный расход воды*, м ³ /с	21900	2930	28880
Средний минимальный расход воды*, м ³ /с	720	124	564
Площадь дельты, км ²	900	—	3250
Величина прилива в устьевом створе, м	0.7–1.5	1.9–2.75	0.4–1.2
Длина устьевое участка по основному рукаву, км	135–152	26	190
Дальность распространения приливных колебаний уровня воды**, км	> 130	23–25	> 150
Дальность распространения обратных течений**, км	100	18–20	90

*Приведено за период моделирования гидрографов стока: 1972–2001 гг. для Северной Двины и Онеги, 2000–2014 гг. — для Печоры.

**Приведено по данным [4, 5, 12].

постепенного уменьшения величин максимальных уровней воды за последние два десятилетия. Помимо опасных затоплений, к неблагоприятным гидрологическим явлениям в устье Северной Двины относится проникновение осолоненных вод, в ее главном судоходном рук. Маймаксе может формироваться клин осолоненных вод протяженностью до 45 км, что осложняет работу коммунального водоснабжения островных районов г. Архангельска [12].

Устьевая область р. Онеги относится к типу приливного устья с однорукавным устьевым участком и открытым отмелым устьевым взморьем. Длина устьевого участка составляет ~26 км. Выше расположены Кокоринские пороги, резко ограничивающие проникновение приливов даже в периоды пониженного речного стока. Русло реки на устьевом участке слабоизвилистое, практически не разветвленное, имеет приливное расширение и по геоморфологическим признакам приближается к эстуарию, пойма практически отсутствует. В Онежском заливе наблюдаются правильные полусуточные приливы величиной от 1.9 до 2.75 м (квадратурный и сизигийный прилив соответственно) [5]. Расходный гидрологический пост расположен в с. Порог в 31 км от устьевого створа, выше зоны проникновения приливов, площадь водосбора до замыкающего створа 55 700 км², средний годовой расход воды 507 м³/с.

Для р. Онеги ввиду характерной формы эстуария опасных затоплений не наблюдается, к опасным гидрологическим явлениям относится проникновение осолоненных вод до 10 км от устьевого створа [5], при этом обычно наблюдается частичное или полное перемешивание водных масс при малых значениях вертикального градиента солености.

Река Печора впадает в Печорскую губу Баренцева моря в его юго-восточной части, образуя обширную многорукавную дельту. Устьевая область реки по своему строению относится к эстуарно-дельтовому типу. Протяженность устьевого участка Печоры — 190 км от устьевого створа до с. Великовисочного. В вершине дельты, расположенной на 70 км ниже, в районе с. Большая Сопка происходит разделение русла на примерно равные

по водоносности рукава Большая Печора и Малая Печора. В районе д. Андег от Малой Печоры отходят несколько рукавов: Тундровый Шар, Средний Шар и Крестовый Шар, а через короткую протоку, называемую “пролив Месино”, водный поток Малой Печоры взаимодействует с потоком Большой Печоры. Площадь дельты Печоры составляет 3250 км² [5]. Дельта Печоры относится к микроприливному с величинами сизигийного прилива 1.0–1.2 м и квадратурного прилива 0.4–0.5 м. Приливы имеют неправильный полусуточный характер, т. е. в течение суток чередуются большая и малая приливная волна. Замыкающий гидрологический пост расположен в с. Оксина в 141 км от устьевого створа. Площадь бассейна — 312 000 км², средний годовой расход воды по г/п с. Оксина — 4402 м³/с.

К наиболее выраженным проявлениям опасных гидрологических процессов в дельте Печоры относятся наводнения стокового и стоково-заторного генезиса. Тренды в изменениях максимальных уровней Печоры в районе устьевой области статистически не значимы, и влияние изменения уровней моря на затопление к настоящему времени не выявлено, хотя исследователи отмечают, что частота превышения уровней воды над уровнями неблагоприятных и опасных явлений возрастает к морскому краю дельты [13]. При этом отмечаются статистически значимые тренды в росте объемов стока в бассейне Печоры (г.п. Усть-Цильма). Максимальная дальность проникновения осолоненных вод в рук. Большая Печора ≤ 10 км, глубоководные ямы с осолоненными водами обнаруживались и выше по течению, однако нарушения водоснабжения водозаборов Нарьян-Мара из-за осолоненных вод за период эксплуатации не происходило [4, 13].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование динамики потока на устьевом участке Северной Двины выполнялось в двумерной плановой модели, разработанной на базе программного комплекса STREAM 2D [9, 19]. Модельная область охватывает весь устьевой участок реки длиной 135 км от морского края дельты до опорного гидрологического поста в с. Усть-Пинега. Нижняя ее граница, вдоль которой задавались отметки уровня воды, на про-

тяжении 50 км проходит по Двинскому заливу в 4–5 км ниже морского края дельты и параллельно ему. Расчетная сетка нерегулярная, гибридная треугольно-четыреугольная, с размером ячеек от 20–100 м в руслах до 200–500 м на пойме (всего около 170 тыс. ячеек). Калибровка и верификация модели выполнялись по полевым данным 2015–2021 гг. [10, 11].

Модель устьевое участка р. Онеги охватывает 31 км от устьевого створа до с. Порог, где расположен гидрологический пост. Гидродинамические модели различной мерности на основе единого рельефа разработаны с помощью программных комплексов HEC-RAS (одномерная модель) и Delft3D (двумерная модель – однослойный вариант 3D-модели). В одномерной модели рельеф русла представлен 63 поперечными профилями, проведенными через 500 м. В двумерной модели рельеф задан прямоугольной сеткой с размером ячеек от 40×20 м в верхней части модели до 100×50 м в нижней. Калибровка и верификация моделей по полевым данным 2017 г. подробно описаны в [32]. Разработанные модели предоставляют достоверный результат расчетов для периода открытого русла на всем протяжении устьевого участка. Судя по результатам моделирования, одномерная и двумерная модели практически одинаково воспроизводят основные характеристики динамики потока на устьевом участке Онеги, поэтому для проведения сценарных расчетов использовалась одномерная модель, требующая меньше вычислительных ресурсов по сравнению с двумерной моделью.

Двумерная гидродинамическая модель устьевой области р. Печоры, разработанная на основе программного комплекса STREAM 2D, охватывает дельту Печоры и приустьевой участок реки до с. Великовисочного, где приливные колебания перестают проявляться даже в условиях глубокой межени. Это позволяет задавать на верхней границе модели постоянный расход воды. Суммарная протяженность области моделирования составляет 190 км, ее ширина достигает 45 км, гибридная расчетная сетка включает более 80 тыс. ячеек. Построение и калибровка модели выполнены на основе полевых данных летней экспедиции 2020 г., верификация – на основе натурных данных 2022 г. [2, 7].

Для оценок возможных изменений расхода воды рек Онеги, Северной Двины и Печоры привлекались результаты расчетов на основе модели формирования стока ECOMAG по данным глобальных климатических моделей для рассматриваемых бассейнов рек. Модель ECOMAG была адаптирована для оценки стока рек исследуемого региона [31] и расчета по данным баз данных реанализа ранее [8], и в данной статье эти этапы подробно не рассматриваются. Для расчетов по данным климатических моделей параметры модели ECOMAG были настроены на основе базы данных реанализов EWMBI с пространственным шагом $0.5 \times 0.5^\circ$ [37]. Для оценки гидрологических последствий изменения климата использованы результаты расчетов по ансамблю глобальных моделей климата GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM – участников эксперимента CMIP5 [34], входящих в базу данных проекта ISI-MIP2 (The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) [29] с учетом четырех сценариев антропогенных воздействий (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5).

Результаты моделирования на основе модели формирования стока ECOMAG дали возможность выполнить оценку изменения средних максимальных и средних минимальных расходов воды на период климатического прогноза 2036–2065 гг., которые далее использовались в качестве входных данных для гидродинамических моделей устьевых областей этих рек.

Оценки возможных изменений уровня моря получены непосредственно по данным ансамбля глобальных моделей климата из баз данных проекта ISI-MIP2 и использовались для задания изменений уровней моря на нижних границах модельных участков.

Непрерывные расчеты по гидродинамическим моделям устьевых областей с детальными расчетными сетками для всего 30-летнего периода климатического прогноза, как это реализовано в методике [6], в настоящее время технически сложно реализуемы, поэтому применен упрощенный сценарный подход. На основе сочетаний указанных изменений средних максимальных и средних минимальных величин

расхода воды и ожидаемых изменений уровня моря разработаны сценарии для выполнения расчетов по гидродинамическим моделям. На верхних границах гидродинамических моделей задавался расход воды, соответствующий рассматриваемому сценарию, а на нижних — прогнозный средний уровень моря, на который накладывались приливные колебания, трансформированные с учетом роста уровня. Рельеф и шероховатость дна области моделирования на современном этапе исследований предполагались неизменными.

В качестве наиболее репрезентативных и практически значимых характеристик для анализа гидродинамики потока выбраны: дальность распространения приливных колебаний уровня воды (с диапазоном > 10 см), дальность распространения реверсивных течений (нулевая средняя по сечению скорость течения во время фазы прилива), диапазон колебания уровня воды, а также максимальные скорости и расходы воды приливного и отливного течения в ключевых створах в районе наиболее развитой прибрежной инфраструктуры, например — у причалов порта Онега в 6.4 км выше устьевого створа реки, у г. Нарьян-Мара на Печоре, в г. Архангельске на Северной Двине.

СЦЕНАРИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СТОКА И УРОВНЯ МОРЯ

Глобальные климатические модели прогнозируют в XXI в. рост среднего уровня юго-западной части Белого моря и южной части Баренцева моря при всех сценариях эмиссии парниковых газов и ледовой обстановки. На юго-западе акватории Белого моря рост уровня воды в среднем по ансамблю моделей к середине XXI в. может составить 27 см при межмодельном разбросе от 15 до 50 см, к 2065 г. эта тенденция монотонного роста уровней моря сохраняется (рис. 2). Для района устья Печоры в южной части Баренцева моря рост уровня к середине XXI в. может составить 29 см при межмодельном разбросе от 15 до 52 см.

Результаты моделирования стока показывают снижение максимальных расходов воды на середину XXI в. (осредненных за 30-летний

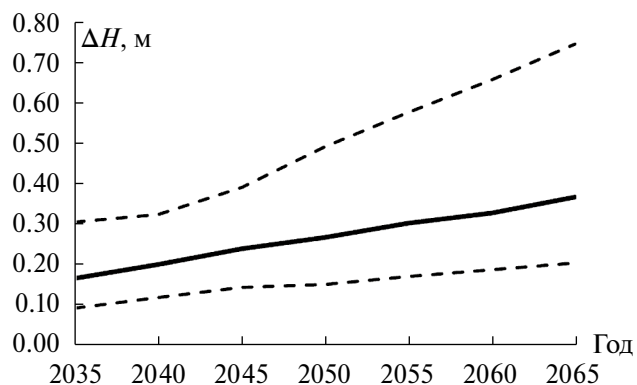


Рис. 2. Повышение уровня ΔH Белого моря (жирная линия) и его возможный диапазон (пунктирные линии) при разных сценариях изменения климата по данным ансамбля глобальных климатических моделей за 2035–2065 гг.

период 2036–2065 гг.) по сравнению с историческим периодом 1972–2001 гг. той же продолжительности. В среднем по ансамблю климатических моделей возможное снижение средних максимальных расходов воды Северной Двины составляет от 15 до 20%, Онеги — от 20 до 27%, Печоры — от 4 до 10% в зависимости от климатического сценария (табл. 2). Положительные аномалии среднемаксимальных расходов воды были получены только при расчетах по модели GFDL-ESM2M для Северной Двины (9%) и замыкающего створа бассейна Онеги (15%), причем среднемаксимальные величины расхода Печоры при использовании данных этой модели меняются незначительно. Таким образом, в расчетах по гидродинамическим моделям учитывались средние по ансамблю моделей и сценариев изменения средних максимальных величин расхода (–18, –24, –7%) для Северной Двины, Онеги и Печоры соответственно. В дополнительных сценариях учитывались аномалии, полученные при расчетах по данным климатической модели GFDL-ESM2M.

Средние минимальные величины расхода Северной Двины и Онеги, по результатам модельных оценок, к середине XXI в. могут существенно снизиться, в среднем изменения могут составить –37 и –39% соответственно. Средние минимальные величины расхода Печоры изменятся незначительно.

Таблица 2. Изменение средних максимальных и средних минимальных расходов воды Северной Двины, Онеги и Печоры за период 2036–2065 гг. (по сравнению с периодом 1971–2001 гг., %) для разных климатических моделей и сценариев радиационного форсинга, по результатам моделирования на основе ИМК ЕСОМАГ

Климатическая модель/сценарий	Средние максимальные				Средние минимальные			
	гср2.6	гср4.5	гср6.0	гср8.5	гср2.6	гср4.5	гср6.0	гср8.5
р. Северная Двина – г.п. с. Усть-Пинега								
GFDL-ESM2M	–1.0	8.6	8.2	8.1	7.1	7.4	0.4	9.2
IPSL-CM5A-LR	–31.8	–36.5	–29.6	–32.3	–40.0	–54.7	–46.4	–58.4
HadGEM2-ES	–8.0	–27.4	–20.4	–26.7	–29.7	–44.3	–35.3	–49.9
MIROC-ESM-CHEM	–21.0	–23.8	–30.8	–21.5	–59.8	–70.9	–63.7	–70.8
Среднее	–15.4	–19.8	–18.2	–18.1	–30.6	–40.6	–36.2	–42.5
р. Онега – г.п. с. Порог								
GFDL-ESM2M	2.3	12.4	15.4	8.5	–3.2	–10.0	–10.1	–12.6
IPSL-CM5A-LR	–38.8	–42.3	–38.6	–34.3	–42.6	–52.4	–44.0	–54.9
HadGEM2-ES	–14.6	–32.9	–29.9	–41.7	–32.2	–40.9	–34.5	–47.0
MIROC-ESM-CHEM	–30.1	–36.7	–44.8	–39.9	–53.4	–67.3	–60.9	–65.8
Среднее	–20.3	–24.8	–24.5	–26.8	–32.8	–42.6	–37.4	–45.1
р. Печора – г.п. с. Оксино								
GFDL-ESM2M	0.4	–0.6	–2.0	–8.1	1.3	1.3	0.7	1.3
IPSL-CM5A-LR	–8.7	–17.1	–10.8	–4.5	5.5	2.1	3.2	6.4
HadGEM2-ES	–3.4	–16.1	–2.4	–6.9	–1.5	–3.0	–1.4	–4.0
MIROC-ESM-CHEM	–5.0	–8.0	–8.9	–7.5	2.6	0.3	0.6	–4.3
Среднее	–4.1	–10.5	–6.0	–6.7	2.0	0.2	0.8	–0.2

Сценарии для гидродинамического моделирования устьевых областей сформированы исходя из возможных изменений среднего уровня моря, средних максимальных и средних минимальных величин расхода воды на середину XXI в. Одна группа сценариев ориентирована на оценку изменений гидродинамического режима устьевых участков рек и оценку потенциально опасных и неблагоприятных его проявлений в условиях прохождения половодья (сценарии 1–4), другая – в условиях межени (сценарии 5–8). Для межени периода использованы оценки относительных изменений средних минимальных годовых расходов воды, отдельные оценки аномалий расходов воды летней и зимней межени на данном этапе не выполнялись.

Отдельно рассмотрена наиболее неблагоприятная ситуация с точки зрения опасности увеличения зон затопления (сценарии 3–4) при одновременном росте уровня моря и увеличении стока в половодье, что может произойти в случае реализации прогноза по климатической модели

GFDL-ESM2M. Аналогичным образом дополнительно рассмотрены сценарии для межени, соответствующие наибольшему снижению стока при расчетах по данным модели MIROC-ESM-CHEM (сценарии 7–8).

Таким образом, в качестве сценариев гидродинамического моделирования устьевых областей Северной Двины, Онеги и Печоры рассмотрены различные сочетания граничных условий, соответствующие как историческому периоду, так и наиболее вероятным или же неблагоприятным условиям середины XXI в.:

сценарий 1: средний максимальный расход воды и средний уровень моря за исторический период (1971–2001 гг.) – базовый сценарий половодья, с которым впоследствии сопоставлялись результаты моделирования на середину XXI в. по сценариям 2–4;

сценарий 2: средний максимальный расход воды на середину XXI в. в сочетании со средним ростом уровня моря – наиболее вероятный сценарий будущего для половодья;

сценарий 3: средний максимальный расход воды на середину XXI в. по модели GFDL-ESM2M (увеличение стока) в сочетании со средним ростом уровня моря — неблагоприятный сценарий будущего в половодье;

сценарий 4: средний максимальный расход воды на середину XXI в. по модели GFDL-ESM2M (увеличение стока) в сочетании с наибольшим увеличением уровня моря — наиболее неблагоприятный сценарий будущего в половодье;

сценарий 5: средний минимальный расход воды и средний уровень моря за исторический период (1971–2001 гг.) — базовый сценарий в межень, с которым впоследствии сопоставлялись результаты моделирования на середину XXI в. по сценариям 6–8;

сценарий 6: средний минимальный расход воды на середину XXI в. в сочетании со средним ростом уровня моря — наиболее вероятный сценарий будущего в межень;

сценарий 7: средний минимальный расход воды на середину XXI в. по модели MIROC-ESM-CHEM (наибольшее снижение минимального стока) в сочетании со средним ростом уровня моря — неблагоприятный сценарий будущего в межень;

сценарий 8: средний минимальный расход воды на середину XXI в. по модели MIROC-ESM-CHEM (наибольшее снижение минимального стока) в сочетании с наибольшим ростом уровня моря — наиболее неблагоприятный сценарий будущего в межень.

Для р. Печоры особенности указанных сценариев — то, что роста среднего максимального расхода к середине XXI в. при расчетах на основе модели формирования стока ECOMAG не отмечено, поэтому для сценариев половодья 3 и 4 был рассмотрен только рост уровня моря. При этом меженный расход также меняется незначительно, сценарии 6 и 7 в данном случае идентичны и учитывают только влияние среднего роста уровня моря без учета изменений стока.

Группа сценариев для зимних условий, требующих подключения ледового блока гидродинамических моделей, на данном этапе работ не рассматривалась, так как требует более детального изучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ СЦЕНАРНЫХ РАСЧЕТОВ

На Северной Двине повышение среднего уровня моря и снижение стока (сценарий 2) в половодье сказывается на увеличении дальности проникновения приливных колебаний уровня воды — на 6 км. Площадь затопления пойменных территорий, по результатам моделирования, для данного сценария меняется незначительно, повышение уровня моря полностью компенсируется за счет уменьшения стока реки в половодье. Сопоставление результатов моделирования для наиболее неблагоприятных сценариев 3 и 4 при росте расхода воды на 9% и уровня моря на 27 и 52 см соответственно показывает, что повышение среднего уровня моря в условиях увеличения расхода половодья приводит к росту площади затопления поймы и дельтовых островов на 13–20% в зависимости от повышения уровня моря (табл. 3). При этом изменение уровня моря в половодье в сочетании с ростом стока в сценариях 3, 4 практически не отразится на дальности распространения приливных колебаний уровня воды на придельтовом участке реки. Обратных течений в устье Северной Двины во время половодья не было отмечено ни при одном из рассмотренных сценариев.

Изменения расхода воды обуславливают изменения скорости половодного потока, это важное обстоятельство для планирования движения и маневрирования судов у причалов порта г. Архангельска. Так, максимальные скорости течения в районе железнодорожного моста у г.п. Смольный Буян понизятся с 1.8 м/с в современных условиях (сценарий 1) до 1.6 м/с (сценарий 2) и, напротив, возрастут при увеличении расхода воды до 2.0 м/с (сценарии 3, 4).

В меженных условиях (сценарии 5–8) наиболее существенно увеличивается дальность распространения обратных течений по главному рукаву — на 22–30 км в зависимости от сценария, при этом наблюдается значительное (в 2–3 раза) уменьшение меженных скоростей течения на некоторых участках судоходной акватории.

На р. Онеге в половодье при всех сценариях произойдет незначительное увеличение области распространения приливных колебаний уровня — с 17 до 18–20 км. При уменьшении стока

Таблица 3. Результаты сценарных расчетов на основе гидродинамических моделей для устьевых областей Северной Двины, Онеги и Печоры при изменениях стока и уровня моря (1–8 – сценарии)

Характеристика	Половодье				Межень			
	1	2	3	4	5	6	7	8
р. Северная Двина – г.п. с. Усть-Пинега								
Изменения стока, %	–	–18	9	9	–	–37	–71	–71
Рост уровня моря, м	–	0.27	0.27	0.50	–	0.27	0.27	0.50
Дальность проникновения приливных колебаний уровня воды, км	64	70	64	65	> 135	> 135	> 135	> 135
Дальность проникновения обратных течений (по главному рукаву), км	0	0	0	0	100	122	130	130
Изменение площади затопления пойм, %	–	–1.3	13	20	–	–	–	–
р. Онега – г.п. с. Порог								
Изменения стока, %	0	–24	15	15	0	–39	–67	–67
Рост уровня моря, м	0.00	0.27	0.27	0.50	0.00	0.27	0.27	0.50
Дальность проникновения приливных колебаний уровня воды, км	17	20	18	20	24.5	25	25	25
Дальность проникновения обратных течений (по главному рукаву), км	< 0.5	3.5	0	< 0.5	22	23	23	23.5
р. Печора – г.п. с. Оксино								
Изменения стока, %	–	–7	0	0	–	0	0	0
Рост уровня моря, м	–	0.29	0.29	0.52	–	0.29	0.29	0.52
Дальность проникновения приливных колебаний уровня воды, км	20		20	20	> 130	> 130	> 130	> 130
Дальность проникновения обратных течений (по главному рукаву), км	0	0	0	0	90	94	94	98
Изменение площади затопления пойм, %	0	–21	2.5	12	–	–	–	–

и одновременном росте уровня моря (сценарий 2) в половодье будут формироваться реверсивные течения в нижней части эстуария на участке протяженностью 3.5 км.

При уменьшении речного стока уменьшаются и скорости течения как на приливе, так и на отливе (рис. 3), максимальная отливная скорость течения в половодье при трех сценариях (1, 3, 4) у порта Онега достигает 1.1–1.2 м/с, а при минимальном в рассматриваемых вариантах речном стоке (сценарий 2) – только 0.9 м/с. Максимальные отметки уровня воды у г. Онеги в половодье будут иметь тенденцию к повышению в соответствии с ожидаемым ростом уровня моря, однако в несколько меньшей степени, чем на морском крае эстуария; рост уровней при сценарии 2 составит 25 см, наибольший уровень – при сценарии 4 – до 50 см (рис. 4).

В период летней межени (сценарии 5–8) при предполагаемом существенном уменьшении ми-

нимального стока р. Онеги с одновременным ростом уровня Белого моря возможно существенное снижение скоростей течения в русле. Так, у причалов порта Онега в современных условиях максимальная приливная скорость течения по результатам моделирования составляет ~0.5 м/с, а в сценарии 2 она в 2.5 раза меньше и составляет 0.2 м/с, что сопоставимо со значениями неразмывающих скоростей потока для мелкого песка. С ростом уровня моря произойдет повышение отметок максимального и минимального уровня в соответствии с повышением среднего уровня моря. Дальность проникновения приливных колебаний уровня воды и реверсивных течений увеличится незначительно – 0.5–1.5 км, так как дальнейшее их распространение ограничено порогами, находящимися в 26 км выше устьевого створа.

В устьевой области р. Печоры обратных течений в половодье в основном рукаве не было

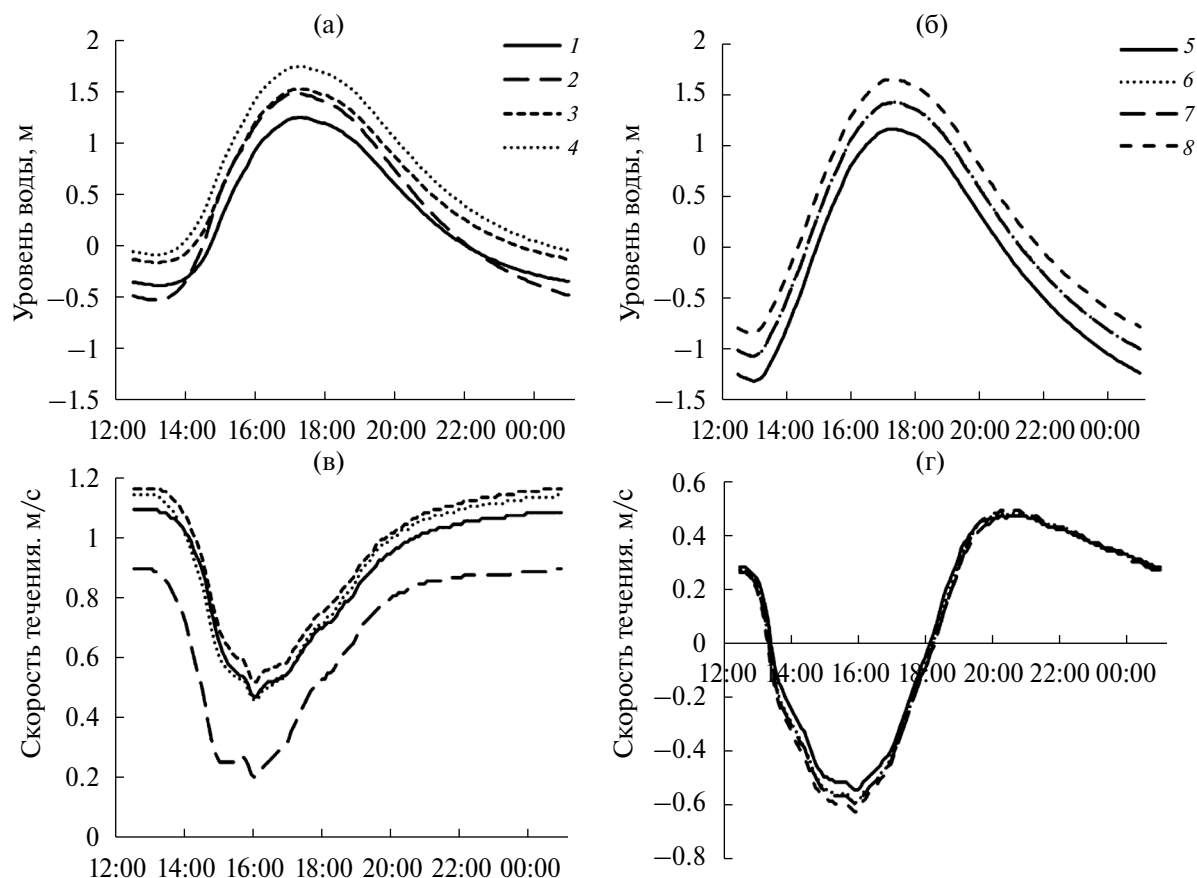


Рис. 3. Изменения уровня воды (а, б) и скорости течения (в, г) в 6.4 км выше устьевое створа р. Онеги при ожидаемых изменениях климата (сценарии 1–8) в половодье (а, в) и в межень (б, г), полученные на основе сценарных расчетов по модели HEC-RAS.

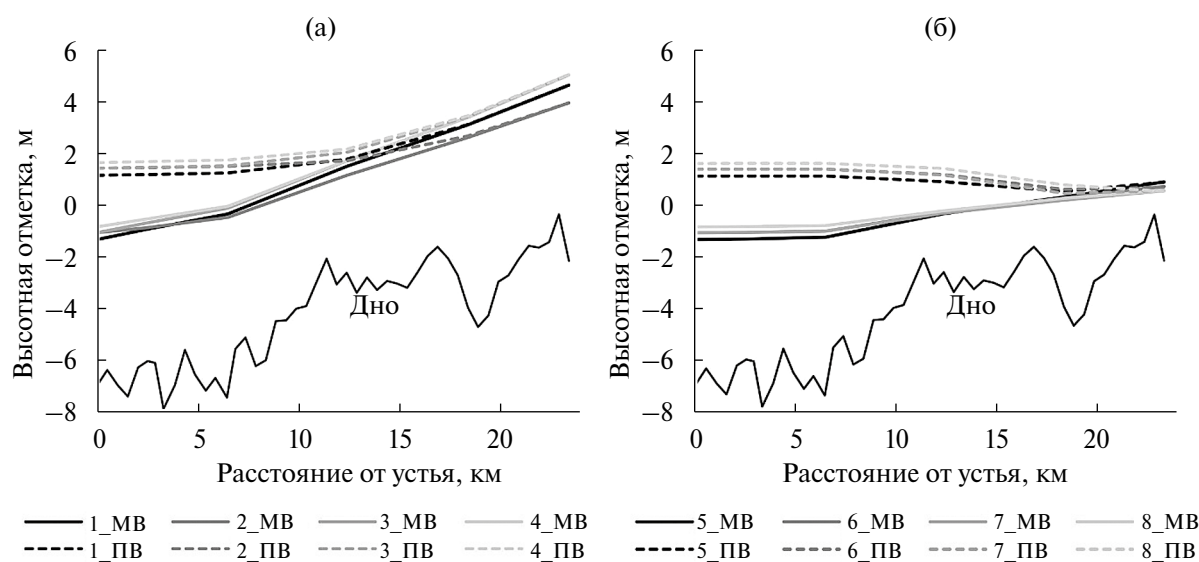


Рис. 4. Продольные профили уровня воды р. Онеги (0–25 км от устьевое створа) в малую (МВ) и полную (ПВ) воду в устьевом створе; а – сценарии 1–4; б – сценарии 5–8, полученные на основе сценарных расчетов по модели HEC-RAS.

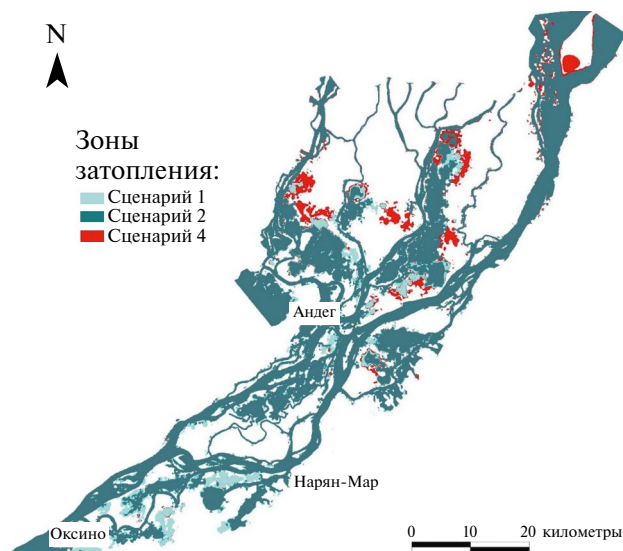


Рис. 5. Изменение зон затопления в устьевой области Печоры при ожидаемых изменениях климата по сценариям 2 и 4 относительно современных условий (сценарий 1).

отмечено ни при каких сценариях. В половодье повышение уровня моря приводит к подпорному увеличению уровней воды по длине основного рукава. Так, в 15 км от устья при росте уровня моря на 29 см уровни повышаются на 7 см, при росте уровня моря на 52 см — на 18 см. Выше по течению подпорное влияние незначительно. Так, у г. Нарьян-Мара в половодье оно не превышает 2–3 см. Рост уровня моря обуславливает увеличение диапазона изменений расхода воды в ходе приливного цикла; например, при росте уровня моря на 52 см диапазон изменения расхода в створе в 15 км от устья в половодье может увеличиться с 2000 до 3000 м³/с.

Площади затопления пойм при росте уровня моря на 29 см и снижении стока половодья на 7% (сценарий 2) снижаются на 21%. При росте уровня моря и расходе половодья, соответствующих современным по сценариям 3–4, возможно увеличение площади затопления пойменных участков; при росте уровня моря на 29 см оно составит ~2.5%; при дальнейшем росте уровня моря на 52 см оно может достигнуть 12% (рис. 5). В основном увеличение зоны затопления при росте уровня моря коснется малоосвоенных участков поймы Печоры в нижней части устьевой области, в районе крупных населенных пунктов (г. Нарьян-Мар, с. Красное) увеличения зон затопления не ожидается.

В межень при росте уровня моря (сценарии 6–8) приливные обратные течения могут наблюдаться выше современного положения на 3–7 км (до расстояния 93–97 км от устья, в черте г. Нарьян-Мара), что может способствовать активизации неблагоприятных русловых процессов, связанных с аккумуляцией наносов на перекачках поблизости от акватории порта. Приливные колебания уровня воды величиной > 10 см в межень, по результатам моделирования, распространяются выше узла разветвления Печоры на Малую Печеру и Большую Печору (далее 120 км от устья) и прослеживаются у с. Оксина (142 км от устья) при всех расчетных сценариях. При этом подпорное влияние роста уровня моря в межень за счет большой дальности проникновения приливных колебаний выше, чем в половодье. Так, у г. Нарьян-Мара в межень, по результатам моделирования, оно составляет ~20 см при росте

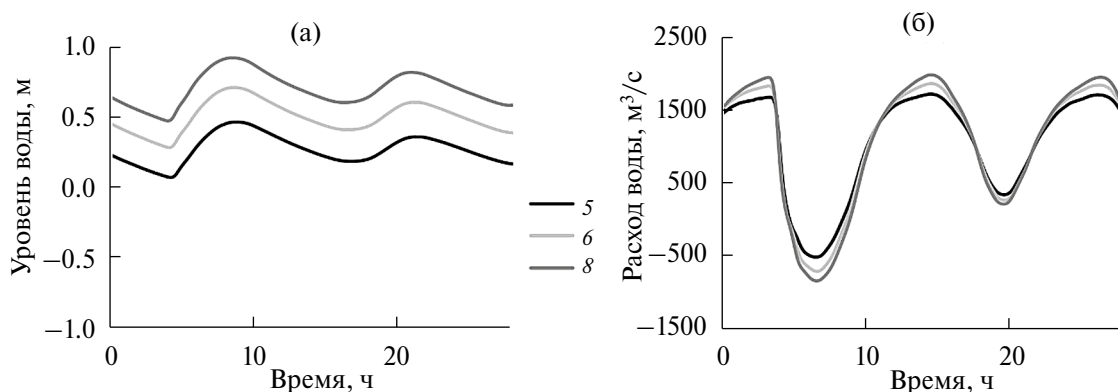


Рис. 6. Уровень воды у г. Нарьян-Мара (100 км от устья) (а) и расход воды в основном рукаве р. Печоры (85 км от устья, контрольная точка 13) (б) в межень. Сценарии: 5 — современные условия; 6 — при росте уровня моря на 29 см, 8 — при росте уровня моря на 52 см.

уровня моря на 29 см и до 40 см при росте уровня моря на 52 см (рис. 6а), возрастает и амплитуда изменения расходов на приливе и отливе (рис. 6б).

ДИСКУССИЯ

Даже относительно упрощенные сценарные расчеты с учетом изменений двух граничных условий — входного расхода воды и уровня моря на постоянную величину — дают представление о сложной картине возможных изменений гидродинамики в устьевых областях и о неоднозначных последствиях данных изменений, требующих дальнейших исследований с точки зрения отдельных процессов и оценки социально-экономических последствий.

Например, неблагоприятные последствия затопления низменной территории при наиболее вероятных сценариях — ожидаемое снижение расходов воды — компенсирует рост уровней моря. Однако в устьевой области р. Печоры расположен Ненецкий заказник, и снижение площадей затопления пойм в дальнейшем может негативно сказываться на состоянии аквальных и субаквальных биоценозов и разнообразии охраняемых видов флоры и фауны.

Для условий судоходства важные факторы — как изменения скоростей течения и уровней воды, так и обусловленные изменениями гидравлики потока неблагоприятные проявления русловых процессов. Снижение скоростей течения в половодье, отмеченное на Северной Двине и, особенно, на Онеге, необходимо учитывать при планировании движения и маневрирования судов у портовых причалов. Весьма неблагоприятное обстоятельство для судоходства — существенное (в 2–3 раза) уменьшение меженных скоростей течения на некоторых участках судоходной акватории Северной Двины, где могут существенно интенсифицироваться процессы отложения наносов и заиления фарватера и рейдов. При этом подпорное повышение уровня воды в межень, прогнозируемое во всех устьевых областях за счет влияния повышения уровня моря, в краткосрочной перспективе — положительный фактор для условий судоходства.

На р. Онеге при уменьшении стока и одновременном росте уровня моря в половодье модельные расчеты диагностируют появление реверсивных течений в нижней части эстуария, что может оказаться наиболее нежелательным фоном для развития русловых процессов в эстуарии. Речные наносы, ранее выносимые половодным потоком реки в Онежский залив, могут начать откладываться непосредственно в эстуарии, не достигнув устьевого створа и заиливая судходный фарватер, что крайне негативно отразится на поддержании навигационных глубин у причалов порта. Возможность интенсификации процессов аккумуляции наносов непосредственно у причалов порта г. Онеги при уменьшении максимального стока подтверждается прогнозируемым изменением скорости течения в районе порта.

Существенное увеличение области распространения обратных течений в межень (на 22–30 км на Северной Двине и на 3–7 км на Печоре) затрагивает участки значительного хозяйственного освоения, включая городскую черту городов Архангельска и Нарьян-Мара — региональных административных центров. При росте уровня моря возможно увеличение интенсивности приливных течений в черте города и вследствие этого — активизация неблагоприятных русловых процессов, а на Печоре — также проникновение обратных течений в западную часть дельты через протоку Месино. В связи с планирующимся строительством судходного канала на Печоре [17] это может привести к проникновению загрязнений в черту города и в западные рукава в ходе его строительства и эксплуатации.

На фоне роста уровня моря и увеличения дальности проникновения обратных течений в перспективе не стоит исключать и возможности проникновения осолоненных вод внутрь устьевых областей. Также стоит иметь в виду, что активное освоение устьевых областей и расширение хозяйственной деятельности могут влиять не меньше, чем ожидаемые изменения климата. Влияние таких мероприятий, как дноуглубление, строительство портовой инфраструктуры, искусственное перераспределение стока между рукавами дельт и т. п., также может быть изучено с применением гидродинамического моделирования.

Для дальнейшего развития моделей устьевых областей, усложнения сценариев, охвата расчетами длительных периодов необходимо расширение областей моделирования до морского края устьевых областей или сопряжение разработанных гидродинамических моделей устьевых областей с моделями течений в прибрежных морских акваториях, что позволит корректно задавать граничные условия со стороны моря в течение всего гидрологического цикла. Также необходимо развитие гидродинамических моделей исследуемых устьевых областей для периодов с ледовыми явлениями, что позволит проводить детальные расчеты гидравлики потока в зимний период.

ВЫВОДЫ

На основе данных глобальных климатических моделей и ансамблевых расчетов по модели формирования стока для устьевых областей Северной Двины, Онеги и Печоры выявлены две основные тенденции изменения определяющих факторов гидродинамики — возможный рост уровня моря и снижение стока. В среднем к середине XXI в. уровень моря в рассматриваемом районе может повыситься на 27–29 см, наибольшие изменения могут составить 50–52 см. Возможные изменения средних максимальных величин расхода воды составляют –18, –24 и –7% для Северной Двины, Онеги и Печоры соответственно, средних минимальных величин для тех же створов –37, –39 и < 1%.

Помимо наиболее вероятных сценариев, учитывающих средние изменения, в расчетах рассмотрены неблагоприятные сценарии при сочетании роста стока половодья, диагностируемого одной из моделей ансамбля (GFDL-ESM2M), и наибольшего уровня моря и сценарии для межени при сочетании наибольшего снижения стока при расчетах по данным модели MIROC-ESM-CHEM с наибольшим ростом уровня моря.

Для каждой из групп сценариев (1–4 для половодья и 5–8 для межени) выявлены как общие для трех устьевых областей, так и специфические проявления в отклике гидродинамических процессов на рост уровня моря и изменения стока. Так, в устьевых областях Северной Двины и Печоры в межень существенно увеличивается даль-

ность проникновения приливных колебаний уровней воды, а на Онеге их дальнейшее проникновение ограничено порогами. В половодье за счет роста уровня моря на Онеге начинают проявляться реверсивные течения, на Северной Двине и Печоре реверсивные течения в половодье не отмечены ни при одном из сценариев. Снижение скоростей течения как в межень, так и в половодье в сочетании с реверсивными течениями может приводить к изменениям темпов и направленности русловых процессов и влиять на условия судоходства. Опасность затопления при росте уровня моря в половодье компенсируется ожидаемым снижением стока, существенного роста площадей затопления при наиболее вероятных сценариях не ожидается.

Авторы выражают благодарность участникам полевых исследований в устьевых областях северных рек А.Н. Василенко, А.А. Попрядухину, С.В. Платонову, Е.С. Повалишниковой, Л.С. Одоеву, А.А. Алексеевой, М. Льюменсу, А.М. Медину (географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова), А.В. Дунюшину (ЗАО “Арктическая изыскательская компания”), Л.Ю. Севастьяновой (гидрометстанция Нарьян-Мар Северного УГМС), Н.А. Демиденко (Институт океанологии РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабян А.М., Алексеева А.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А., Фингерт Е.А., Демиденко Н.А., Лебедева С.В. Опыт и проблемы гидрологических изысканий в приливных устьях // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Двенадцатой Общерос. конф. изыскательских организаций. М.: Геомаркетинг, 2016. С. 260–263.
2. Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А. Приливная динамика вод в дельте Печоры в летнюю межень // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2022. № 1. С. 167–179.
3. Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН, 2020. 346 с.
4. Борщевский Е.В., Мишин Д.В., Ермакова Г.С., Горелиц О.В., Фатхи М.О., Жбаков К.К., Ракчеева Е.А., Строков А.А., Турсунова Г.Ш., Севастьянова Л.Ю. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой

- области реки Печора / Под ред. *Е.В. Борщенко, О.В. Горелиц*. М.: Иваново: ПресСто, 2021. 152 с.
5. *Ермакова Г.С., Сапожникова А.А., Милютин И.Ю., Ракчеева Е.А., Горелиц О.В., Строков А.А., Турсунова Г.Ш., Куликова Ж.М., Демиденко Н.А., Борщенко Е.В., Санин А.Ю., Фатхи М.О., Жбаков К.К., Мигунов Д.А., Малимон О.В.* Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Онега. Воронеж: Воронежская обл. типография, 2023. 334 с.
 6. *Крыленко И.Н.* Оценка характеристик затопления при изменениях климата // Вод. ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 485–491.
 7. *Крыленко И.Н., Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А.* Двумерная гидродинамическая модель устьевой области реки Печоры // Морские исследования и образование (MARESEDU-2021). Т. 1. М.: ПолиПРЕСС, 2021. С. 321–324.
 8. *Крыленко И.Н., Голосной Д.А., Жук В.А.* Оценка притока воды в Белое море с территории бассейнов рек Онеги и Северной Двины на основе модели формирования стока // Морские исследования и образование MARESEDU-2018. Т. 1. М.: ПолиПРЕСС, 2029. С. 161–171.
 9. *Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А.* Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // ГеоРиск. 2015. № 1. С. 18–25.
 10. *Лебедева С.В., Алабян А.М., Попрядухин А.А.* Верификация гидродинамической модели устья реки Северной Двины по полевым данным 2016–2017 гг. // Морские исследования и образование (MARESEDU-2017). М.: ПолиПРЕСС, 2017. С. 670–673.
 11. *Лебедева С.В., Одоев Л.С., Панченко Е.Д., Алабян А.М., Демиденко Н.А., Льюменс М., Турыкин Л.А.* Измерения расходов воды и учет водного стока в приливной устьевой области Северной Двины // Сб. докл. Международ. науч. конф. памяти Ю.Б. Виноградова. Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен. СПб.: Изд-во ВВМ, 2023. С. 279–284.
 12. *Лебедева С.В., Ракчеева Е.А., Горелиц О.В., Борщенко Е.В., Мишин Д.В., Турсунова Г.Ш., Фатхи М.О., Жбаков К.К., Строков А.А., Куликова Ж.М., Шевченко Л.Б., Землянов И.В.* Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Северная Двина / Под ред. *Е.В. Борщенко, Е.А. Ракчеева, О.В. Горелиц*. М.: Воронеж: ЮКОНЪ, 2022. 196 с.
 13. *Магрицкий Д.В., Агафонова С.А., Банищикова Л.С., Головин К.И., Севастьянова Л.Ю., Сумачев А.Э.* Гидрологические опасности в устье Печоры // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 2. С. 185–209.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-185-209>
 14. *Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В.* Основы гидрологии устьев рек: учебное пособие. М.: Триумф, 2018. 316 с.
 15. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
 16. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 662 с.
 17. Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года. <https://docs.cntd.ru/document/561091982?marker=656010> (дата обращения 18.06.2024)
 18. *Третьяков М.В., Шикломанов А.И.* Оценка влияния на гидрологические процессы в Обской губе климатических и антропогенных изменений на ее водосборе // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 5. С. 608–624.
 19. *Alabyan A.M., Lebedeva S.V.* Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River: 2D simulation // J. Hydroinformatics. 2018. V. 20. № 4. P. 798–814.
 20. *Aleksyuk A.I., Belikov V.V.* The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // J. Computational Phys. 2019. V. 390. P. 232–248.
 21. *Biguino B., Haigh I.D., Dias J.M., Brito A.C.* Climate change in estuarine systems: Patterns and gaps using a meta-analysis approach // Sci. Total. Environ. 2023. V. 858. 159742.
 22. *Brunner G.* HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Version 5.0. Davis, CA, USA: US Army Corps of Engineers, Inst. Water Resour., Hydrol. Engineering Center, 2016. 960 p.
 23. *Chen W., Chen K., Kuang C., Zhu D.Z., He L., Mao X., Liang H., Song H.* Influence of sea level rise on saline water intrusion in the Yangtze River Estuary, China // Appl. Ocean Res. 2016. V. 54. P. 12–25.
 24. *Costa Y., Martins I., de Carvalho G.C., Barros F.* Trends of sea-level rise effects on estuaries and estimates of future saline intrusion // Ocean. Coast. Manag. 2023. V. 236. 106490.
 25. Delft3D-FLOW User Manual. Version 3.15. Deltares, 2018. 694 p.
 26. *Dunn F.E., Darby S.E., Nicholls R.J., Cohen S., Zarfl C., Fekete B.M.* Projections of declining fluvial sediment

- delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14 (8). 084034.
27. Elahi M.W.E., Jalón-Rojas I., Wang X.H., Ritchie E.A. Influence of Seasonal River Discharge on Tidal Propagation in the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta, Bangladesh // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2020. V. 125 (11).
 28. Hong B., Liu Z., Shen J., Wu H., Gong W., Xu H., Wang D. Potential physical impacts of sea-level rise on the Pearl River Estuary, China // *J. Mar. Syst.* 2020. V. 201. 103245. <https://www.isimip.org/> (дата обращения: 18.06.2024)
 29. Kosuth P., Callède J., Laraque A., Filizola N., Guyot J.L., Seyler P., Fritsch J.M., Guimarães V. Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River // *Hydrol. Process.* 2009. V. 23 (22). 3141–3150.
 30. Motovilov Y., Gelfan A. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin empirical and modelling approaches // *IAHS Publ: Cold and mountain region hydrological systems under climate change: towards improved projections.* 2013. V. 360. P. 105–112.
 31. Panchenko E., Leummens M., Lebedeva S. Hydrodynamic modelling of the Onega River tidal estuary // *E3S Web of Conferences.* V. 163. Saint-Petersburg: EDP Sci., 2020. P. 01008.
 32. Sun Y., Bricheno L.M., Payo-Payo M., Rahman M.M., Burns N.M. Simulation of freshwater transport network and salt flux in the Bangladesh delta // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2022. V. 270. 107839.
 33. Scown M.W., Dunn F.E., Dekker S.C., van Vuuren D.P., Karabil S., Sutanudjaja E.H., Santos M.J., Minderhoud P.S.J., Garmestani A.S., Middelkoop H. Global change scenarios in coastal river deltas and their sustainable development implications // *Glob. Environ. Chang.* 2023. V. 82. 102736.
 34. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012. V. 93. P. 485–498.
 35. Tessler Z.D., Vörösmarty C.J., Grossberg M., Gladkova I., Aizenman H., Syvitski J.P.M., Foufoula-Georgiou E. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world // *Sc.* 2015. V. 349 (6248). P. 638–643.
 36. Weedon G.P., Balsamo G., Bellouin N., Gomes S., Best M.J., Viterbo P. The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data // *Water Resour. Res.* 2014. № 50. P. 7505–7514.
 37. Wu W., Yang Z., Zhang X., Zhou Y., Tian B., Tang Q. Integrated modeling analysis of estuarine responses to extreme hydrological events and sea-level rise // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2021. V. 261. 107555.

MODELING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE MOUTH OF RIVERS OF THE EUROPEAN TERRITORY OF RUSSIA UNDER POSSIBLE CLIMATE CHANGES

I. N. Krylenko^{a, b, *}, S. V. Lebedeva^c, E. D. Panchenko^{a, b}, A. M. Alabyan^{a, b}

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, 119991 Russia

^bWater Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

^cState Hydrological Institute, St. Petersburg, 199053 Russia

*e-mail: krylenko_i@mail.ru

Possible scenarios for the impact of climate change on hydrodynamic processes in the mouths of the Northern Dvina, Onega and Pechora Rivers are considered. For this purpose, we used hydrodynamic models of estuary areas previously developed by the authors in the STREAM 2D, HEC-RAS and Delft3D software packages. Projected sea level rise values, obtained from data of the global climate models GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES, MIROC-ESM-CHEM, were used to establish the lower boundary condition of hydrodynamic models.

As the upper boundary conditions of hydrodynamic models, runoff change estimations performed using the ECOMAG runoff formation model were taken into account. Based on ensemble simulations, two main tendencies in changes in the factors of hydrodynamics of estuarine areas were identified and analyzed - sea level rise and river flow reduction. Scenarios of spring flood and summer-autumn low water periods were modeled, corresponding to different combinations of boundary conditions for the historical period, as well as for the most probable and most unfavorable hydrometeorological conditions of the mid-21st century. An analysis of possible changes in the hydrodynamic characteristics of the water flow and their impact on various aspects of hydro-ecological safety and use of water resources in the estuarine areas of the rivers under study is presented.

Keywords: estuaries, numerical modeling, hydrodynamics, flooding, climate change, runoff formation, ECOMAG, STREAM 2D.