

УДК 551.46

© Н. А. Тихонова<sup>1,2</sup>, Е. А. Захарчук<sup>1</sup>, А. В. Гусев<sup>2,3,5</sup>, В. С. Травкин<sup>\*1,2</sup>, А. А. Павловский<sup>1,4</sup>, 2024

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, 199178, Санкт-Петербург, 10 линия В.О., д. 33–35

<sup>2</sup>Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6 с 1

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук, 119333, Москва, ул. Губкина, 8

<sup>4</sup>Научно-исследовательский и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга, 191023, Санкт-Петербург, ул. Зодчего Росси, 1–3

<sup>5</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36

\*vtravkin99@gmail.com

## ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ НАМЫВОВ ТЕРРИТОРИЙ НА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ В НЕВСКОЙ ГУБЕ ВО ВРЕМЯ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА ЗАЩИТЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ОТ НАВОДНЕНИЙ

Статья поступила в редакцию 09.01.2024, после доработки 31.05.2024, принята в печать 05.06.2024

### Аннотация

С помощью численных экспериментов с трехмерной бароклинной гидродинамической моделью Балтийского моря, имеющей сеточную область со сгущением в районе дельты Невы и Невской губы и учитывающей работу комплекса защиты Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС), исследуется влияние современных намывов территорий на изменения высоты водной поверхности в Невской губе и дельте Невы во время штормовых нагонов в условиях работы КЗС при разных объемах стока Невы. Моделируются гидрологические условия, которые сложились в начале декабря 2015 г., когда к Санкт-Петербургу подошел шторм «Десмонд», вызвавший на востоке Финского залива три опасных подъема уровня, следовавших один за другим. Показано, что произведенные в последние полвека намывы территорий не оказывают заметных изменений в положении уровенной поверхности Невской губы при закрытых затворах КЗС во время штормовых нагонов. В зависимости от стока Невы, при закрытых затворах КЗС дополнительные подъемы уровня в Невской губе из-за намывов не превышают 1–5 см, в то время как в дельте Невы они достигают 20,5 см. Подъем уровня до 161 см у Горного института, при котором в Санкт-Петербурге фиксируются наводнения, происходит из-за намывов раньше на 1–2 ч. При максимальном для осенне-зимнего периода объеме стока Невы, через 27 ч после закрытия затворов КЗС, в Невской губе у пункта Горный институт фиксируется опасное наводнение, а через 48 ч — особо опасное.

**Ключевые слова:** численное гидродинамическое моделирование, штормовые нагоны, опасные подъемы уровня моря, намывы территорий, Невская губа, Дельта Невы, комплекс защиты Санкт-Петербурга от наводнений, сток Невы

UDC 551.46

© N. A. Tikhonova<sup>1,2</sup>, E. A. Zakharchuk<sup>1</sup>, A. V. Gusev<sup>2,3,5</sup>, V. S. Travkin<sup>\*1,2</sup>, A. A. Pavlovsky<sup>1,4</sup>, 2024

<sup>1</sup>St Petersburg State University, 33-35 10<sup>th</sup> line V.O., 199178 St Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Zubov State Oceanographic Institute, Kropotkinsky Lane 6, 119034 Moscow, Russia

<sup>3</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the RAS, 8 Gubkina Str., 119333 Moscow, Russia

<sup>4</sup>State “Research and Design Center of St. Petersburg Master Plan”, 1–3 Zodchego Rossi Str., 191023 St Petersburg, Russia

<sup>5</sup>Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Nakhimovsky av. 36, 117997 Moscow, Russia

\*vtravkin99@gmail.com

## THE INFLUENCE OF MODERN ALLUVIAL AREAS ON SEA LEVEL CHANGES IN THE NEVA BAY DURING STORM SURGES IN THE CONDITIONS OF OPERATION OF THE SAINT PETERSBURG FLOOD PREVENTION FACILITY COMPLEX

Received 09.01.2024, Revised 31.05.2024, Accepted 05.06.2024

### Abstract

Using numerical experiments with a three-dimensional baroclinic hydrodynamic model of the Baltic Sea, which covers the re-fined grid area around the Neva Delta and Neva Bay, and takes into account the operations of the Saint Petersburg Flood Prevention Facility Complex (FPFC), we investigate the influence of modern alluvial areas on sea level changes in the Neva Bay and Neva Delta

Ссылка для цитирования: Тихонова Н.А., Захарчук Е.А., Гусев А.В., Травкин В.С., Павловский А.А. Влияние современных намывов территорий на изменения уровня в Невской губе во время штормовых нагонов в условиях работы комплекса защиты Санкт-Петербурга от наводнений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 2. С. 103–118. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-9

For citation: Tikhonova N.A., Zakharchuk E.A., Gusev A.V., Travkin V.S., Pavlovsky A.A. The Influence of Modern Alluvial Areas on Sea Level Changes in The Neva Bay During Storm Surges in The Conditions of Operation of The Saint Petersburg Flood Prevention Faculty Complex. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 2, 103–118. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(2)-9

during storm surges, under different volumes of Neva River discharge. The hydrological conditions that developed in early December 2015, when Storm Desmond approached St. Petersburg, which caused three dangerous level rises in the east of the Gulf of Finland, one after the other. The alluvial deposits of territories do not have noticeable changes in the sea level of the Neva Bay with the gates of the FPFC closed during storm surges. It is shown that, depending on the runoff of the Neva, with the gates of the FPFC closed, additional sea level rises in the Neva Bay due to alluviation do not exceed 1–5 cm, while in the Neva Delta they reach 20.5 cm. The rise of the sea level to 161 cm at the Mining University, at which floods are recorded in St. Petersburg, occurs due to alluviation 1–2 hours earlier. At the maximum volume of Neva runoff for the autumn-winter period, 27 hours after the closure of the gates of the FPFC, a dangerous flood is recorded in the Neva Bay near the Mining University point, and 48 hours later — a particularly dangerous one.

**Keywords:** numerical hydrodynamic modeling, storm surges, dangerous sea level rises, alluvial areas, Neva Bay, Neva Delta, Saint Petersburg Flood Prevention Facility Complex, Neva runoff

## 1. Введение

Начиная с первых генеральных планов Санкт-Петербурга начала XVIII века, его развитие осуществлялось в соответствии с градостроительной концепцией создания новой морской столицы российского государства, предполагавшей, в том числе, освоение прибрежной акватории восточной части Финского залива и формирование морского фасада города [1]. Существующий архитектурный облик приморской части Санкт-Петербурга оформился, в том числе, с учетом ее подверженности опасным подъемам уровня моря, которые неоднократно приводили к наводнениям.

Наводнениями в Санкт-Петербурге принято считать подъемы уровня более 160 см относительно нуля Кронштадтского футштока (НКФ), за который принимается среднее многолетнее положение водной поверхности Балтийского моря у гидрометеорологического поста Кронштадт на о. Котлин [2]. При таких подъемах уровня моря воды р. Невы выходят из берегов, и в Санкт-Петербурге происходят подтопления городских территорий.

Причины наводнений в Невской губе — штормовые нагоны, которые представляют собой значительные подъемы уровня моря в прибрежной зоне, вызываемые суммарным действием вращения Земли, анемобарических сил в глубоком циклоне и длинной волны, которая генерируется под прямым воздействием сил касательного трения ветра и горизонтального градиента атмосферного давления, или же в результате резонанса этих сил с собственными колебаниями морского бассейна [3–10].

Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), совместно с администрацией города, установлены три градации наводнений: опасные, с подъемами уровня от 161 до 210 см над НКФ; особо опасные, от 211 до 299 см над НКФ, и катастрофические, с подъемами уровня  $\geq 300$  см над НКФ [2].

За всю историю Санкт-Петербурга в городе произошло 310 наводнений, из которых 236 были опасными, 71 — особо опасными и 3 — катастрофическими [2, 5]. Максимальный подъем уровня в устье Невы наблюдался во время катастрофического наводнения 19 (7) ноября 1824 г. и составил 421 см над НКФ.

Из 310 зарегистрированных наводнений 239, или 76 %, произошли с сентября по декабрь, с января по март отмечено 45 наводнений (15 %), весной и летом (апрель-август) — 26 случаев (9 %) [2, 5]. Такое распределение случаев наводнений в течение года объясняется сезонным изменением интенсивности циклонической деятельности в атмосфере и, отчасти, развитием ледяного покрова.

За прошедшие три столетия были проведены масштабные инженерно-строительные работы по хозяйственному освоению приморских территорий, повышению отметок низинных заболоченных участков, их защите от затопления и подтопления.

В качестве примеров наиболее значимых проектов последней четверти XVIII — начала XIX столетий можно привести подсыпку юго-западной части Васильевского острова при размещении на ней промышленных предприятий, формирование архитектурного ансамбля Стрелки и парадных набережных Большой Невы.

Для середины XIX века было характерно создание специальных островов в целях организации складов и развития торговли: Масляный буян, Сельдяной буян (Гутуевский остров), Сальный буян, Тучков буян. Наиболее значимым проектом конца XIX века явилось строительство Санкт-Петербургского порта в районе Гутуевского и Вольного островов.

Наиболее масштабные работы по освоению приморских низинных территорий и прилегающей акватории для размещения на них селитебных зон произошли в XX веке. Если в довоенный период генеральным планом Л.А. Ильина предусматривалось формирование приморского зеленого каркаса города в виде непрерывной линейной системы парков от п. Ольгино на северном побережье до п. Стрельна на южном берегу Невской губы, то в середине XX века градостроительная тенденция изменилась на развитие комплексной общественно-деловой застройки на этих землях.

Работы по намыву территорий развернулись в районе Лахты, на Васильевском острове, в Юго-Западной части города. В результате общая площадь искусственных земельных участков составила более 3000 гектаров, на которых разместились кварталы типовой многоэтажной многоквартирной застройки, Южно-Приморский парк Победы, Парк имени 300-летия Санкт-Петербурга [1].

Происходящие гидротехнические работы по созданию намывных территорий, архитектурно-строительное проектирование и эксплуатация объектов капитального строительства на них осуществляются в условиях современных изменений климата, одним из последствий которых является повышение среднего уровня Мирового океана. Результаты анализа спутниковой альтиметрической информации показывают, что средний рост уровня Мирового океана за период 1993–2021 гг. составил 3,3 мм/год [11]. Учитывая, что Балтийское море через узкие Датские проливы и Северное море имеет связь с Атлантикой, рост уровня Мирового океана сказывается и на росте уровня Балтики. Оценки величин линейных трендов в изменениях уровня Балтийского моря, по данным спутниковой альтиметрии за период 1993–2022 гг., показали, что уровень Балтики растёт быстрее, чем уровень Мирового океана: средняя по площади всего моря величина тренда составляет 4,8 мм/год [12–13], а самый большой рост уровня отмечается на севере Ботнического и на востоке Финского заливов, где он растёт со скоростью 5–6 мм/год [12], что увеличивает вероятность событий штормовых нагонов, наводнений, абразии берегов в этих районах Балтики.

Для предотвращения угроз, связанных с опасными подъёмами уровня моря, в 1980 г. началось строительство комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС), которое продолжалось с перерывами до 2010 г. Официальное открытие КЗС состоялось 12 августа 2012 года.

КЗС расположен приблизительно в 25 км от Санкт-Петербурга и имеет протяжённость по акватории Невской губы 22,2 км<sup>1</sup>. В состав КЗС входят 2 судопропускных и 6 водопропускных сооружений, а также 11 каменно-земляных дамб, 7 мостов и автомобильный тоннель под морским каналом<sup>2</sup>.

После получения сигнала об угрозе наводнения затворы КЗС начинают закрываться, когда уровень моря около дамбы достигает 70–90 см. Закрытие затворов продолжается около одного часа. После закрытия затворов КЗС Невская губа представляет собой полностью замкнутый бассейн, положение уровенной поверхности которого определяется ветровыми условиями и стоком Невы. При отсутствии ветра закрытая дамбой Невская губа равномерно заполняется водами Невы, и для среднего многолетнего стока Невы в 2500 м<sup>3</sup>/с скорость подъёма уровня в Невской губе составляет 2,27 см/ч, в то время как под действием ветра западных румбов формируется уклон водной поверхности, и скорость роста уровня на востоке Невской губы будет превышать эти значения [14]. При длительном закрытии затворов КЗС и значительном повышении уровня в Невской губе скорость притока вод Невы будет уменьшаться из-за уменьшения градиента уровня между Ладожским озером и Невской губой [14].

По данным Дирекции комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга, за период эксплуатации КЗС в городе было предотвращено 35 наводнений<sup>3</sup>. Однако, несмотря на работу КЗС, проблема опасных подъёмов уровня остаётся насущной для районов Санкт-Петербурга и Ленинградской области, расположенных к западу от КЗС. Здесь, во время штормовых нагонов, подвержены подтоплению прибрежные территории, размываются береговая линия, пляжи Курортного района Санкт-Петербурга, участки шоссе дорог, наносится ущерб объектам хозяйственной деятельности, построенным в береговой полосе. Численные эксперименты на гидродинамической модели показали, что работа КЗС вызывает дополнительный подъём уровня к западу от него на 3–10 % [15].

Было отмечено также несколько случаев, когда при закрытых затворах КЗС во время предотвращения угрозы наводнений уровень моря в районе станции Горный институт поднимался выше отметки 160 см над НКФ, в результате чего в городе фиксировались опасные наводнения. Так, 16 ноября 2010 г. при закрытых затворах КЗС уровень моря на востоке Невской губы поднялся до отметки 184 см. 28 декабря 2011 г., несмотря на работу КЗС, уровень моря у станции Горный институт поднялся до 169 см. И, наконец, 27 сентября 2018 г. подъём уровня при закрытых створах КЗС составил 179 см. И, хотя, при проектировании КЗС допускалось, что в редких случаях при закрытии КЗС до двух суток уровень в Невской губе может достигать 180 см, следует проверить возможные сценарии формирования особо опасных и катастрофических наводнений в Санкт-Петербурге в условиях работающего КЗС.

<sup>1</sup> <https://dambaspb.ru> (дата обращения: 09.01.2024)

<sup>2</sup> <https://dambaspb.ru> (дата обращения: 09.01.2024)

<sup>3</sup> <https://dambaspb.ru> (дата обращения: 09.01.2024)

Завершение строительства в 2011 году Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений активизировало различные градостроительные планы по освоению акватории Невской губы и Финского залива. Действующим Генеральным планом Санкт-Петербурга предусмотрен намыв территорий в размере от 1250 до 1500 га.

К настоящему времени в Невской губе сформированы следующие территории: «Морской фасад» (Васильевский остров) (238 га); порт Бронка (г. Ломоносов) (120 га); станция метро «Зенит» (Крестовский остров) (20 га). В Невской дельте произведено расширение Пироговской набережной (2 га), Приморского проспекта (1 га), строительство моста Бетанкура через р. Малую Неву в районе острова Серный (0,2 га). Практически завершён намыв второй очереди «Морской фасад» (вторая очередь освоения) (Васильевский остров) (238 га), запланирован «Северный парус» (Кронштадт) (236 га), в Финском заливе — «Новый берег» (г. Сестрорецк) (370 га) [16].

В связи с этим, для принятия обоснованных проектных решений представляется необходимым проведение оценки влияния намывных территорий на формирование опасных подъёмов уровня в Невской губе при закрытых затворах КЗС.

Основная цель статьи — с помощью численных экспериментов с трёхмерной бароклинической гидродинамической моделью Балтийского моря исследовать влияние современных намывов территорий на изменчивость уровня в акватории Невской губы и дельте Невы во время штормовых нагонов при разных объёмах стока Невы и различной продолжительности закрытия затворов КЗС, а также оценить для этих условий возможность формирования в Санкт-Петербурге опасных и особо опасных наводнений.

Для достижения этой цели моделируется ситуация, которая сложилась в декабре 2015 года. В этот период в Северной Атлантике под действием глубокого атмосферного циклона сформировался шторм «Десмонд», из-за которого страны Европы столкнулись с мощнейшими наводнениями. 5 декабря «Десмонд» подошёл к Санкт-Петербургу, вызвав на востоке Финского залива 3 опасных подъёма уровня моря, которые следовали один за другим. Скорость ветра по данным Гидрометцентра России в Ленинградской области достигала значений 19–24 м/с. Из-за угрозы наводнений закрывались судопропускные и водопропускные затворы КЗС. Максимальный период их непрерывного закрытия составил 41 ч.

## 2. Данные и методы

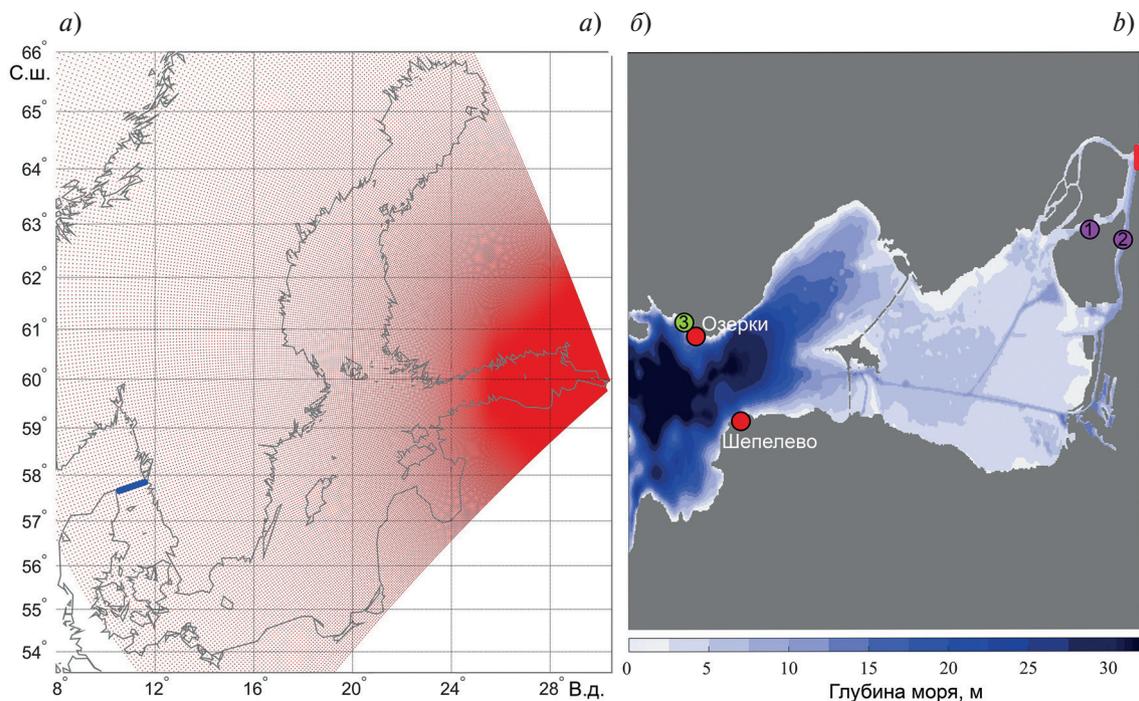
### 2.1. Описание модели

Для моделирования опасных подъёмов уровня моря на востоке Финского залива Балтийского моря была выбрана трехмерная нелинейная бароклиническая гидродинамическая модель INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Эта модель была разработана в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской Академии Наук [17–19].

В основе INMOM лежит полная система нелинейных примитивных уравнений гидродинамики океана в сферических координатах в приближениях гидростатики и Буссинеска. В качестве вертикальной координаты используется безразмерная величина  $\sigma = (z - \zeta) / (H - \zeta)$ , где  $z$  — обычная вертикальная координата;  $\zeta = \zeta(\lambda, \varphi, t)$  — отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности как функция долготы  $\lambda$ , широты  $\varphi$  и времени  $t$ ;  $H = H(\lambda, \varphi)$  — глубина моря. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура, солёность, отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности. Для расчета плотности используется уравнение состояния, учитывающее сжимаемость морской воды и специально предназначенное для численных моделей [20].

В INMOM включена модель термодинамики морского льда, состоящая из 3-х модулей. Модуль термодинамики [21] описывает намерзание льда, выпадение снега с дальнейшим превращением его в лед, а также их таяние за счёт тепловых процессов. Модуль динамики льда рассчитывает скорость его дрейфа, которая изменяется за счёт воздействия ветра, поверхностных течений океана, суточного вращения Земли, наклона уровня поверхности океана и взаимодействия льдин друг с другом, описываемого упруго-вязко-пластичной реологией [22]. Модуль переноса льда служит для расчёта эволюции ледяного и снежного покровов вследствие дрейфа, для чего используется монотонная схема переноса [23], обеспечивающая неотрицательность концентраций и массы снега и льда.

В модели использовалась криволинейная сетка со сгущением в Невской губе и полюсом в Санкт-Петербурге (рис. 1, а). Пространственное разрешение сетки на востоке Невской губы составило 50 м, у КЗС — 150 м, а на юго-западе Балтийского моря около 6 км (рис. 1, а). Количество вертикальных сигма-слоев в модели равно 20.



**Рис. 1.** Криволинейная сетка гидродинамической модели Балтийского моря с полюсом в Санкт-Петербурге, синей линией в Каттегате обозначена жидкая граница (а). Укрупнённый район модельной области восточной части Финского залива с Невской губой и дельтой Невы. Красной линией показана жидкая граница, где задавался речной сток Невы (б). Зелёный кружок с номером 3 обозначает ближайшую к станции Озерки точку сеточной области реанализа ERA-5. Цифрами 1 и 2 на рис. 1, б отмечены районы дельты Невы, где по результатам моделирования оценивались изменения во времени дополнительных подъёмов уровня воды, вызванные намывами территорий

**Fig. 1.** Curvilinear grid of the hydrodynamic model of the Baltic Sea with a pole in St. Petersburg, the blue line in the Kattegat indicates the liquid boundary (a). An enlarged area of the model region of the eastern part of the Gulf of Finland with the Neva Bay and the Neva Delta (b). The red line shows the liquid boundary where the river runoff of the Neva was set. The green circle with the number 3 indicates the point next to the Ozerki station in the ERA-5 reanalysis grid area. The numbers 1 and 2 in Fig. 1, b the areas of the Neva Delta are marked, where, according to the results of modeling, changes in time of additional water level rises caused by alluvial areas were estimated

Данные, которые использовались для создания батиметрии в Невской губе, были предоставлены СЗ УГМС, с разрешением 500 м. Также для уточнения глубин были использованы современные навигационные карты.

На основании цифрового массива, предоставленного научно-исследовательским и проектным центром Генерального плана Санкт-Петербурга, были созданы маски расчётной области суша/море в двух вариантах (рис. 2), один из которых описывал состояние береговой линии до современных намывов территорий, соответствующее 1966 г. (рис. 2, а), и береговую линию в настоящий момент времени (рис. 2, б). Рис. 2, в демонстрирует намыты за последние 57 лет территории. Хорошо видно, что наибольшие по площади намывы произведены на западе Васильевского о-ва (рис. 2, в).

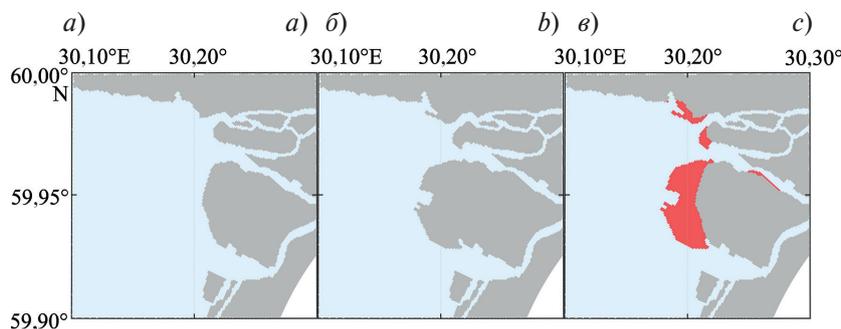
Значительно меньшие по площади намывы территорий произведены на западе Крестовского о-ва (метро «Зенит»), в районе Приморского проспекта и в Малой Неве, у моста Бетанкура (рис. 2, в).

## 2.2. Начальные и граничные условия

В качестве начальных условий задавались среднемесячные данные температуры и солёности воды с вертикальным разрешением 5 м и горизонтальным разрешением 5.6 км, полученные из системы «Copernicus Marine Environment Monitoring Service»<sup>4</sup>.

На твердых участках боковой границы потоки тепла и соли задавались равными нулю, а для скорости течений использовались условия непротекания и свободного скольжения. На дне задавались условия непротекания и квадратичного придонного трения.

<sup>4</sup> <http://marine.copernicus.eu> (дата обращения: 07.06.2023)



**Рис. 2.** Маски сеточной области без намывных территорий (а), с учетом намывных территорий (б) и разница между ними, показанная красным цветом (в)

**Fig. 2.** Masks of the grid area without alluvial territories (a), considering alluvial territories (b) and the difference between them, shown in red (c)

На жидкой границе в проливе Каттегат вдоль  $57^{\circ}44'$  с. ш. в буферной зоне, представляющей собой полосу шириной 15 км, значения температуры и солёности принимались равными среднемесячным значениям за 2015 г. Кроме этого, здесь также задавались ежечасные значения уровня моря, полученные на станции Gedser ( $57.66$  с. ш.,  $11.72$  в. д.). Данные инструментальных измерений уровня моря интерполировались в точки сетки буферной зоны вдоль всей жидкой границы. Таким образом, для скорости течений здесь применялось условие протекания.

В качестве стока рек использовались климатические среднемесячные данные расходов 28 рек, впадающих в Балтийское море, за исключением р.Невы. Для задания стока Невы были привлечены данные о её месячных расходах в п. Новосаратовка с 1945 по 2018 гг., предоставленные Северо-Западным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗ УГМС). Сток рек, как граничное условие в модели INMOM оказывает влияние на изменение солёности района, куда впадает река, а также влияет на изменение уровня моря за счет объема воды, который попадает из реки в море.

Для задания граничных условий на поверхности моря использовались данные реанализа ERA5 [24], полученные с сайта <https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения: 08.06.2023). Были подготовленные поля значений следующих метеорологических характеристик: длинноволновой и коротковолновой радиации, температуры воздуха и точки росы на высоте 2 м, суммарных осадков, твёрдых осадков, атмосферного давления, ветра. Пространственное разрешение данных реанализа  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ , дискретность — 3 ч.

### 2.3. Верификация и коррекция данных реанализа ERA-5 об изменчивости ветра

Точность математического моделирования колебаний уровня моря во время штормовых нагонов во многом зависит от степени соответствия задаваемых в модели ветровых условий наблюдающимся в этот период характеристикам ветра.

Для проверки адекватности описания ветровых условий на востоке Финского залива данными реанализа ERA5 было проведено сравнение статистических характеристик измеренного ветра на прибрежной гидрометеорологической станции (ГМС) Озерки с данными о ветре в ближайшей к ней точке реанализа ERA5 (см. рис. 1). Ежечасные значения ветра в Озерках были предоставлены СЗ УГМС. Перед сравнением инструментальные измерения ветра приводились к дискретности данных реанализа ERA5 путём осреднения до 3 часов.

Для сравнения измеренного и модельного ветра с помощью векторно-алгебраического метода анализа случайных процессов [25–26] оценивались следующие статистические характеристики изменчивости скорости и направления ветра:  $\mathbf{m}_w$  — математическое ожидание векторного процесса (модуль  $|m_w|$  и направление  $\alpha_m$ ); различные инварианты его среднего квадратического отклонения (СКО): линейный инвариант тензора СКО  $[I_1(0)]^{0,5}$ , где  $I_1(0) = \lambda_1(0) + \lambda_2(0)$  — линейный инвариант тензора дисперсии векторного процесса, определяемый через полудлины главных осей  $\lambda_1(0)$  и  $\lambda_2(0)$  эллипса дисперсии и ориентацию  $\alpha^{\circ}$  его большой оси относительно географической системы координат;

$$\lambda_{1,2}(0) = \sqrt{\frac{1}{2} \left( D_{vv} + D_{uu} \pm \sqrt{(D_{vv} - D_{uu})^2 + (D_{vu} + D_{uv})^2} \right)}, \quad (1)$$

$$\alpha^\circ = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left( \frac{D_{vu} + D_{uv}}{D_{vv} - D_{uu}} \right), \quad (2)$$

где  $D_{vv}$ ,  $D_{uu}$  — дисперсии составляющих векторного процесса.

Для исследования изменчивости ветра  $W$ , кроме оценки эллипсов СКО, рассчитывался показатель устойчивости ветра  $r = \sqrt{I_1(0)} / |m_w|$ , где  $|m_w|$  — модуль вектора математического ожидания. При  $r > 1$  интенсивность колебательных движений в потоке ветра преобладает над интенсивностью среднего переноса, то есть ветровой поток является неустойчивым, и, наоборот, чем меньше единицы значение  $r$ , тем устойчивее поток.

Для оценки корреляции между измеренными значениями ветра на станциях и ветра по данным реанализа ERA-5, согласно методике, изложенной в работах [25–26], рассчитывались два инварианта нормированной взаимной корреляционной тензор-функции: линейный инвариант  $I_1^{VU}(\tau)$  и индикатор вращения  $D^{VU}(\tau)$ .

Линейный инвариант  $I_1^{VU}(\tau)$  равен следу матрицы корреляционной тензор — функции  $K_{VU}(\tau)$  (3) и характеризует общность интенсивностей коллинеарных изменений векторных процессов  $V(t)$  и  $U(t)$

$$K_{VU}(\tau) = \begin{pmatrix} K_{v_1 u_1}(\tau), K_{v_1 u_2}(\tau) \\ K_{v_2 u_1}(\tau), K_{v_2 u_2}(\tau) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $K_{VU}(\tau)$  — взаимно-корреляционная функция двух векторных процессов  $V(t)$  и  $U(t)$ ;  $\tau$  — сдвиг по времени;  $v_1$  — составляющая векторного процесса  $V(t)$  на параллель;  $v_2$  — составляющая векторного процесса  $V(t)$  на меридиан;  $u_1$  — составляющая векторного процесса  $U(t)$  на параллель;  $u_2$  — составляющая векторного процесса  $U(t)$  на меридиан.

Индикатор вращения  $D^{VU}(\tau)$  равен разности недиагональных компонентов матрицы корреляционной тензор-функции  $K_{VU}(\tau)$  и характеризует общность ортогональных изменений в процессах  $V(t)$  и  $U(t)$ , причем, если  $D^{VU}(\tau) > 0$ , то процесс  $U(t)$  развернут в среднем относительно процесса  $V(t)$  на заданном промежутке времени по часовой стрелке, если  $D^{VU}(\tau) < 0$ , то против часовой стрелки.

Затем рассчитывался суммарный коэффициент корреляции:

$$R_{VU}(\tau) = \sqrt{[I_1^{VU}(\tau)]^2 + [D^{VU}(\tau)]^2}. \quad (4)$$

Кроме этого, оценивались максимальные модули скорости ветра  $|W|_{\max}$  во время каждого из трёх опасных подъёмов уровня моря.

В табл. 1 представлены результаты сравнения статистических характеристик измеренного ветра на станции Озерки с подобными характеристиками, полученными по данным реанализа ERA5. Различия в направлениях ( $\alpha_m$ ) сравниваемых векторов мат. ожидания составляют  $9^\circ$ , а в направлениях больших осей ( $\alpha^\circ$ ) эллипсов ср. кв. отклонения  $16^\circ$ . Такие расхождения не являются большими, учитывая, что точность измерения направления ветра составляет  $\pm 10^\circ$ . Оценки сравниваемых показателей устойчивости ветра ( $r$ ) одинаковые, и они свидетельствуют, что ветровой поток на рассматриваемом нами временном отрезке, стремится к устойчивому состоянию. Коэффициент корреляции ( $R$ ) между измеренным и модельным ветром высокий (0.84), однако оценки модуля мат. ожидания, инвариантов ср. кв. отклонения и максимумов ветра 5 и 7 декабря по данным реанализа ERA5 являются заниженными относительно статистических характеристик измеренного ветра на ГМС Озерки. Причем, занижение значений максимумов ветра 5 и 7 декабря по данным реанализа ERA-5 является существенным, составляя 16 и 25 %, соответственно.

Таблица 1

Table 1

Статистические характеристики измеренного ветра на станции Озерки и ветра по данным реанализа ERA5 в точке 3 (рис. 1) без коррекции и с коррекцией, согласно работе [27]

Statistical characteristics of the measured wind at the Ozerki station and the wind according to the ERA5 reanalysis data at point 3 (Fig. 1) without correction and with correction, according to the work [27]

Станция, точка реанализа ERA5	$m_w$		$[I_1(0)]^{0.5}$	$\sqrt{\lambda_1(0)}$	$\sqrt{\lambda_2(0)}$	$\alpha^\circ$	$R$	$r$	$ W _{\max}$ , 5.12.2015	$ W _{\max}$ , 6.12.2015	$ W _{\max}$ , 7.12.2015
	$ m_w $ , м/с	$\alpha_m$ , град.	м/с	м/с	м/с				м/с	м/с	м/с
Озерки	8,4	268	7,9	6,4	4,6	-5		0,9	19,8	15,2	19,9
точка 3	7,8	259	7,3	6,2	3,8	-21	0,84	0,9	16,6	15,7	15,0
точка 3 (коррекц.)	8,6	259	8,0	6,8	4,2	-21	0,84	0,9	18,4	17,3	16,5

В связи с этим, была проведена коррекция значений ветра реанализа ERA5 по всему ансамблю его полей с помощью методики, описанной в работе [27–28]. Согласно данной методики, коррекция ветра производилась по следующей формуле:

$$\begin{cases} W_{corr} = (15 + 1,5) \cdot \exp(0,071 \cdot [W - 15]), & \text{при } W \geq 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \\ W_{corr} = W + \frac{1,5}{15} \cdot W, & \text{при } W < 15 \frac{\text{м}}{\text{с}} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $W_{corr}$  — модуль скорости ветра с учетом коррекции данных реанализа ERA5,  $W$  — исходные данные ветра из реанализа ERA5.

На рис. 3, в показан временной ход векторов скорости ветра, полученного по данным реанализа ERA5 с учетом коррекции, а в нижней строчке табл. 1 представлены статистические параметры значений ветра после коррекции. Хорошо видно, что в большинстве случаев, после коррекции, статистические характеристики ветра из реанализа ERA5 и измеренного ветра лучше согласуются между собой. Поэтому в рамках численных экспериментов для задания граничных условий на поверхности моря использовались скорректированные значения ветровых условий из реанализа ERA5 по всему ансамблю полей ветра.

#### 2.4. Верификация рассчитанных по модели изменений уровня моря

На рис. 3, а представлены результаты сравнения мареографных измерений уровня моря на станции Шепелёво в конце ноября — начале декабря 2015 г. с рассчитанными по модели INMOM рядами уровня моря с использованием исходных и скорректированных по формуле (5) данных изменений ветра из реанализа ERA5. Видно, что использованная нами коррекция ветра улучшает результаты моделирования: рассчитанная с коррекцией кривая изменения уровня моря становится ближе к его измеренным значениям (рис. 3, а). Однако, коррекция ветра не приводит к полному устранению ошибок в расчетах: первый, рассчитанный по модели с коррекцией ветра опасный подъём уровня моря, который произошел рано утром 5 декабря 2015 г., занижен на 40 см, относительно измеренного. Значение второго рассчитанного подъема уровня, случившегося в 03 часа 6 декабря, занижено, относительно измеренного уровня, на 15 см. Лучше всего с помощью моделирования был описан третий штормовой нагон уровня моря, который произошел рано утром 7 декабря, когда рассчитанный уровень моря был выше измеренного всего на 3 см (рис. 3, а).

Результаты вейвлет-анализа измеренных и рассчитанных по модели рядов уровня в районе Шепелёво свидетельствуют, что во время опасных подъёмов уровня моря в декабре 2015 г. генерировались колебания с периодами около 26 часов (см. рис. 3, б), что близко к периоду основной моды собственных колебаний Балтийского моря [29–30].

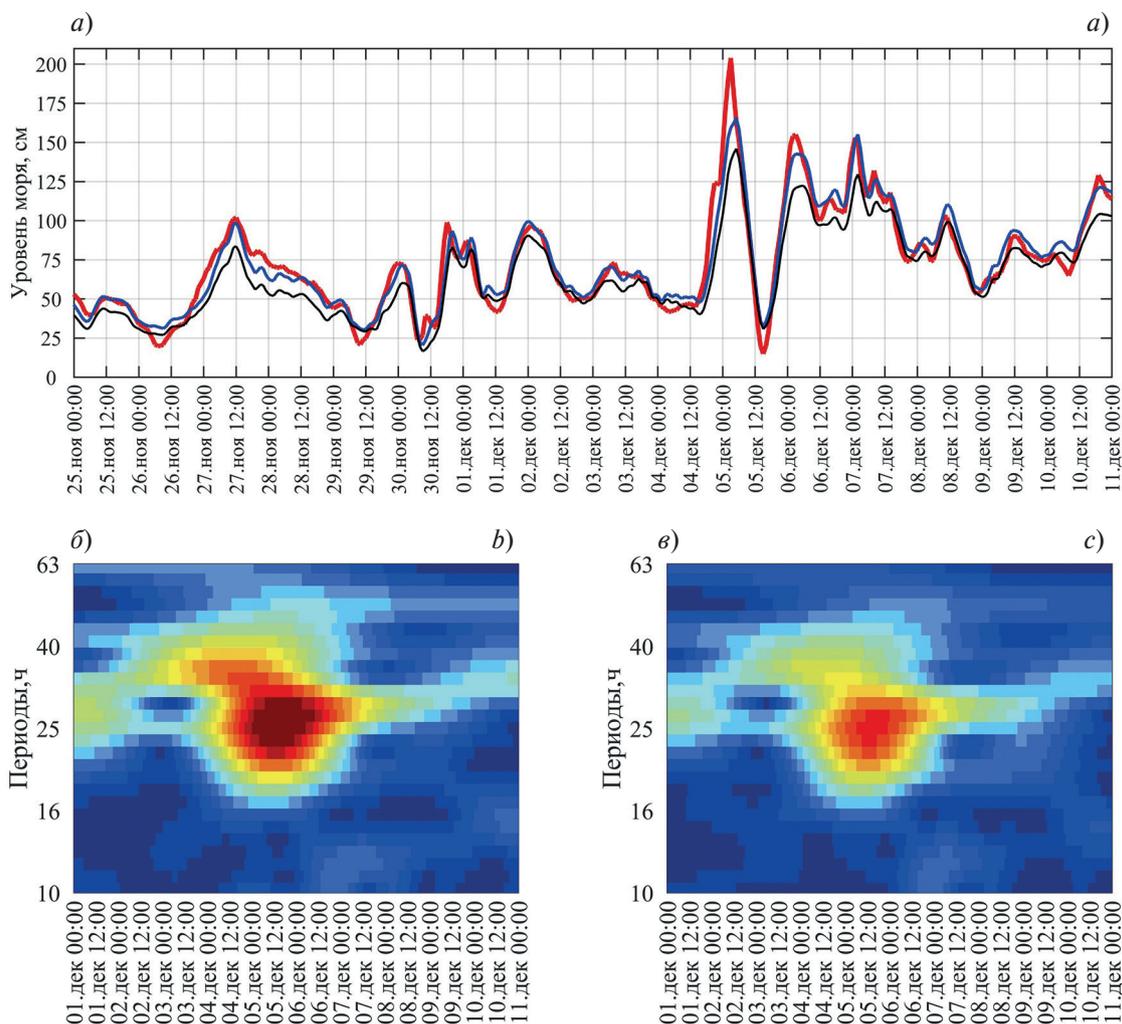
#### 2.5. Описание численных экспериментов

В рамках принятых начальных и граничных условий модельные расчеты проводились с 1 июля 2015 по 10 декабря 2015 г. с выводом результатов каждый час. Всего было проведено четыре численных эксперимента:

- 1) без учета современных намывов территорий с реальными среднемесячными значениями стока Невы, которые в декабре 2015 г. достигали 2000 м<sup>3</sup>/с;
- 2) с учетом современных намывов территорий с реальными среднемесячными значениями стока Невы, которые в декабре 2015 г. достигали 2000 м<sup>3</sup>/с;
- 3) без учета современных намывов территорий с реальными среднемесячными значениями стока Невы, в которых декабрьское значение стока в 2000 м<sup>3</sup>/с было заменено на 4080 м<sup>3</sup>/с;
- 4) с учетом современных намывов территорий с реальными среднемесячными значениями стока Невы, в которых декабрьское значение стока в 2000 м<sup>3</sup>/с было заменено на 4080 м<sup>3</sup>/с;

Значение стока Невы в 4080 м<sup>3</sup>/с было оценено нами как максимальное за осенне-зимние периоды (сентябрь-январь) с 1945 по 2018 гг., так как, согласно статистическим данным, 86 % наводнений в Санкт-Петербурге произошли с сентября по январь [2–5].

4 декабря в 20:00 часов, во время начала первого декабрьского опасного подъёма уровня моря, когда уровень моря с внешней стороны КЗС достигал 80 см, затворы КЗС во всех четырёх экспериментах закрывались, и, далее, расчеты велись в условиях, когда Невская губа была полностью закрыта дамбой от акватории Финского залива. Таким образом, во всех четырёх экспериментах воспроизводились 3 опасных подъёма уровня моря, которые произошли 5, 6 и 7 декабря 2015 г. на востоке Финского залива в условиях работающего КЗС для двух разных объёмов расхода Невы, с учетом и без учета намыва территорий.



**Рис. 3.** Ряд ежечасных измерений уровня моря на гидрометеорологической станции Шепелёво (красная линия) и рассчитанные по модели INMOM ряды уровня моря, полученные с использованием исходных (черная линия) и скорректированных по формуле (5) (синяя линия) данных изменений ветра из реанализа ERA5 (a). Вейвлет разложения рядов измеренных значений уровня в Шепелёво (б) и рассчитанных значений уровня в районе Шепелёво (в)

**Fig. 3.** A series of hourly sea level measurements at the Shepelevo hydrometeorological station (red line) and sea level series calculated using the INMOM model, obtained using the initial (black line) and adjusted by formula (5) (blue line) wind change data from the ERA5 reanalysis (a). The wavelet decomposition of the series of measured sea level values in Shepelevo (b) and calculated sea level values in the Shepelevo area (c)

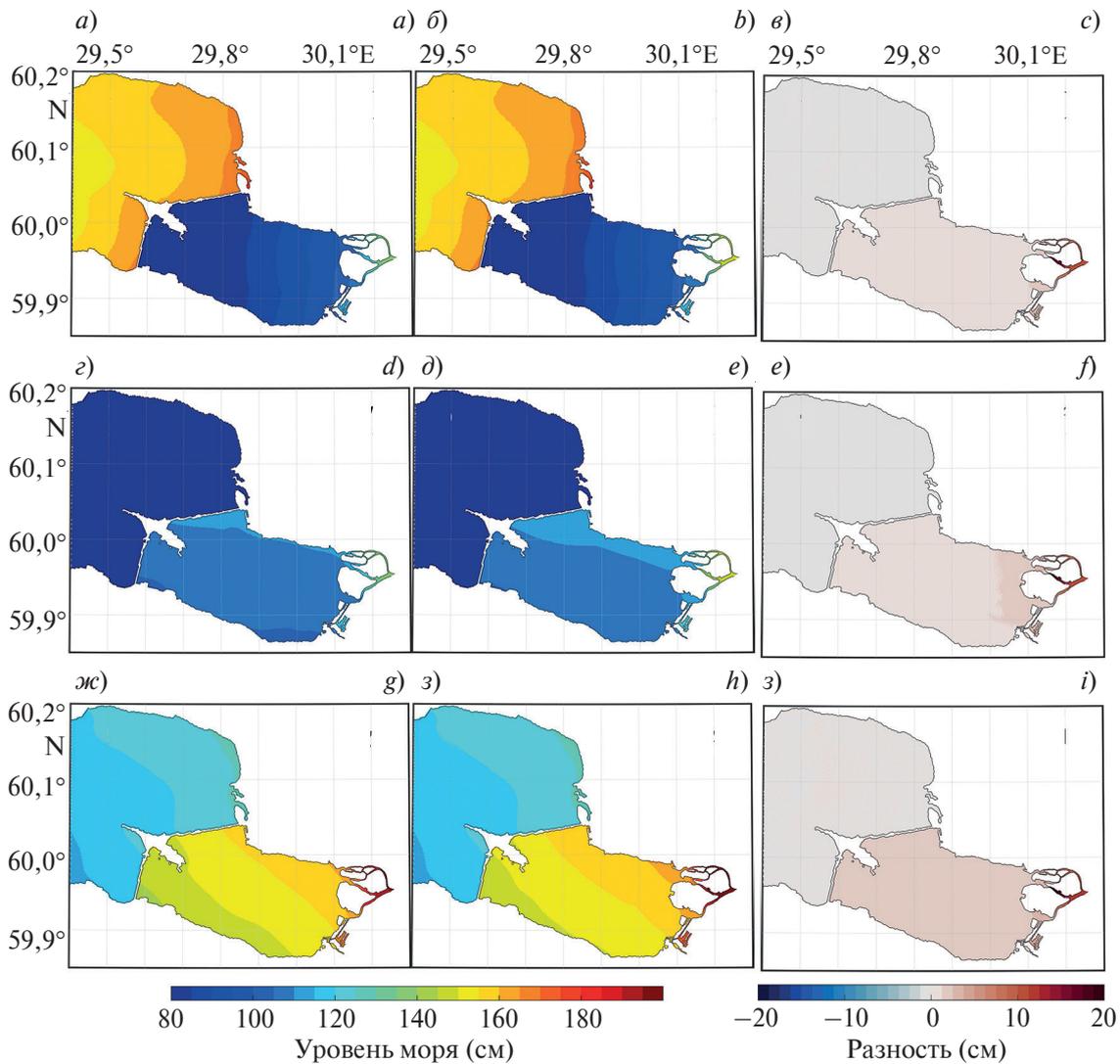
### 3. Результаты численных экспериментов

На рис. 4 показаны результаты численных экспериментов со стоком Невы  $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Через 12 ч после закрытия затворов КЗС, уровень на востоке Невской губы повысился до 105 см, а градиент уровня между Кронштадтом и Васильевским о-вом составил 25 см. В дельте Невы уровень достиг значений 140–150 см. Разница уровней между двумя экспериментами (без намывов и с намывами) в Невской губе не превышала 1 см, а в дельте Невы достигала 10–18 см (рис. 4, в).

Через 24 ч после закрытия дамбы уровень моря в Невской губе повысился до 120 см, а в дельте Невы — до 150 см. Разница между значениями уровня моря в двух экспериментах составляла на большей акватории Невской губы около 1 см, и только на востоке губы она достигала 2 см. В дельте Невы разница уровня между двумя экспериментами составила 11–18 см (рис. 4, е).

Через 48 часов после закрытия затворов КЗС уровень моря повысился до 140 см на западе Невской губы и до 165 см на её востоке, а в дельте Невы подъем уровня достиг 200 см. Дополнительный подъем уровня моря за счет намывов в Невской губе составил от 2 до 3 см., а в дельте Невы 12–18 см (рис. 4, и).



**Рис. 4.** Положение уровенной поверхности в Невской губе и дельте Невы для стока Невы  $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ , при отсутствии намывов (*а, г, ж*), с намывами (*б, д, з*) и разность между ними (*в, е, и*), через 12 (*а, б, в*), 24 (*г, д, е*) и 48 (*ж, з, и*) часов после закрытия затворов КЗС

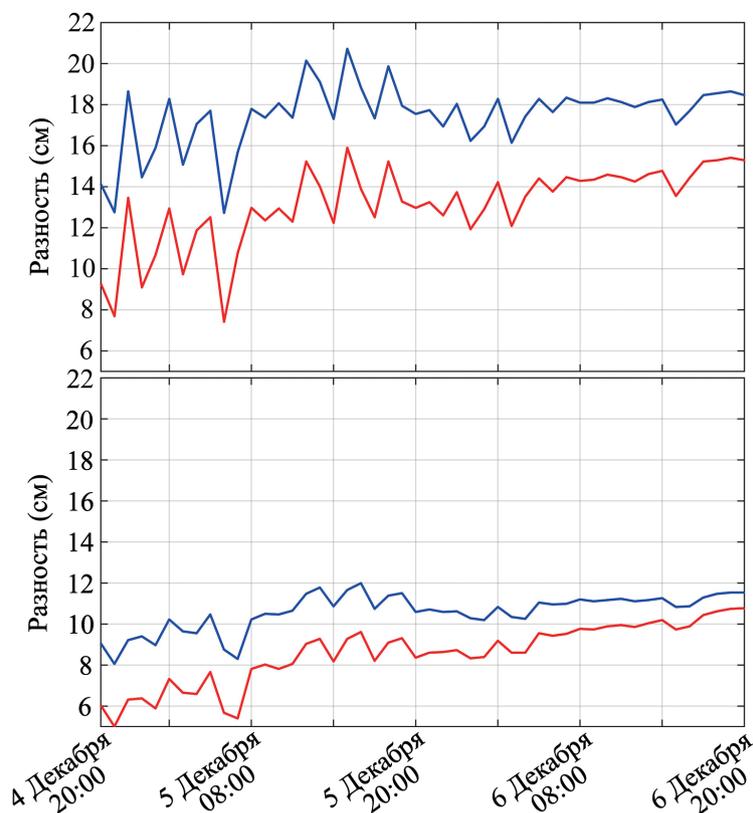
**Fig. 4.** The position of the sea surface in the Neva Bay and the Neva delta for the runoff of the Neva river of  $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ , in the absence of alluvium (*a, d, g*), with alluvium (*b, e, h*) and the difference between them (*c, f, i*), after 12 (*a, b, c*), 24 (*d, e, f*) and 48 (*g, h, i*) hours after closing the gates of the FPFC

Более подробный анализ изменений во времени дополнительных подъемов уровня в дельте Невы из-за намывов территорий показал (см. рис. 5), что самый большой дополнительный подъем уровня, достигавший 20,5 см, отмечался через 19 ч после закрытия затворов КЗС в Малой Неве между мостами Бетанкура и Тучковым (точка 1 на рис. 1). У стрелки Васильевского о-ва максимальный дополнительный подъем уровня из-за намывов произошел через 20 ч после закрытия затворов КЗС и составил 12 см (точка 2 на рис. 1).

На графиках разности уровня моря видны высокочастотные затухающие колебания, которые могут быть связаны с трёхчасовыми сейшмами. В измерениях уровня моря и других океанологических характеристик на востоке Финского залива такие колебания встречаются [31], но остаются плохо изученными.

Результаты численных экспериментов показали также, что повышение уровня моря у Горного института до 161 см после закрытия дамбы из-за современных намывов происходит на 2 ч раньше, чем при отсутствии намывов (табл. 2).

На рис. 6 показаны результаты численных экспериментов с объемом стока Невы  $4080 \text{ м}^3/\text{с}$ . Через 12 ч после закрытия затворов КЗС уровень моря на западе Невской губы достигает 85 см, а на востоке 130 см. Дополнительный подъем уровня из-за намывов равен на всей акватории Невской губы 2 см. В дельте Невы подъем уровня повышается до 150 см., а дополнительный подъем уровня, обусловленный намывами, здесь достигает 7–13 см.



**Рис. 5.** Разница уровня моря между экспериментами с намывами — без намывов в точке № 1 (а) и точке № 2 (б) дельты Невы (см. рис. 1) после закрытия затворов КЗС при стоке Невы 2000 м<sup>3</sup>/с (синяя линия) и 4080 м<sup>3</sup>/с (красная линия)

**Fig. 5.** The difference in sea level between experiments with alluvial deposits — without alluvial deposits at point № 1 (a) and point № 2 (b) of the Neva Delta (see Fig. 1) after closing the gates of the FPFC at the runoff of the Neva river of 2000 m<sup>3</sup>/s (blue line) and 4080 m<sup>3</sup>/s (red line)

Таблица 2

Table 2

**Значения промежутков времени после закрытия затворов КЗС, когда уровень моря в Невской губе у Горного института повышается до наводненческого значения 161 см**

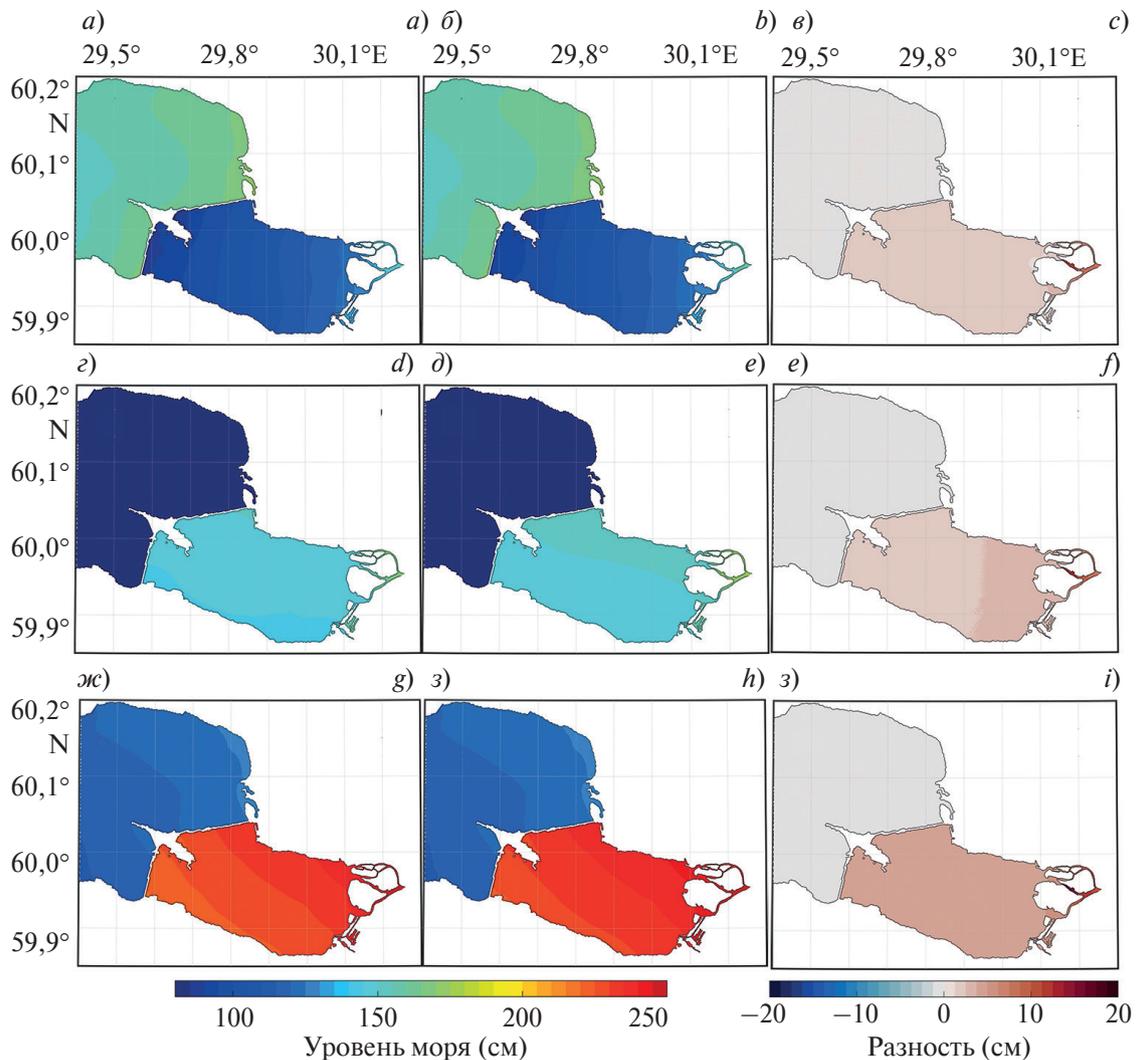
**The values of the time intervals after the closure of the gates of the FPFC, when the sea level in the Neva Bay at the Mining University rises to a flood value of 161 cm**

Расход Невы, м <sup>3</sup> /с	Без учета намывов, часы	С намывами, часы
2000	46	44
4080	27	26

Через 24 часа после закрытия дамбы уровень моря на севере Невской губы повышается до 155 см, а на юге — до 145 см. Дополнительный подъём уровня моря из-за намывов территорий составляет в Невской губе 2–4 см, а в дельте Невы 8–13 см.

Через 48 часов после закрытия затворов КЗС в Невской губе отмечается особо опасное наводнение с подъёмом уровня до 225–245 см. Дополнительный подъём уровня моря из-за современных намывов территорий в Невской губе составляет 4–5 см (рис. 6, и), а в дельте Невы 11–15,5 см.

Оценки изменений во времени дополнительных подъёмов уровня моря за счет намывов территорий в дельте Невы свидетельствуют, что их максимальное значение в точке 1 отмечается через 19 часов, когда оно составляет 16 см (рис. 6). В точке 2 (у Стрелки Васильевского о-ва) максимальное значение дополнительного подъёма уровня в 10,8 см наблюдается через 48 ч после закрытия затворов КЗС (рис. 6).



**Рис. 6.** Положение уровенной поверхности в Невской губе и дельте Невы для стока Невы 4080 м<sup>3</sup>/с, при отсутствии намывов (а, г, ж), с намывами (б, д, з) и разность между ними (в, е, и), через 12 (а, б, в), 24 (г, д, е) и 48 (ж, з, и) часов после закрытия затворов КЗС

**Fig. 6.** The position of the sea level in the Neva Bay and the Neva delta for the Neva runoff of 4080 m<sup>3</sup>/s, in the absence of alluvium (a, d, g), with alluvium (b, e, h) and the difference between them (c, f, i), after 12 (a, b, c), 24 (d, e, f) and 48 (g, h, i) hours after closing the gates of the FPFC

Наибольший дополнительный подъём уровня в точке 1 дельты Невы связан с тем, что при строительстве моста Бетанкура здесь из-за намывов территорий произошло сужение русла Малой Невы (см. рис. 2).

#### 4. Заключение

Результаты численных экспериментов с трёхмерной бароклинной гидродинамической моделью IN-MOM, целью которых было исследовать влияние современных намывов территорий на изменения уровня в Невской губе и дельте Невы во время штормовых нагонов в условиях работы КЗС, позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Сравнение рассчитанных с помощью модели INMOM и измеренных колебаний уровня в районе станции Шепелёво показало, что в начале декабря 2015 г., модель воспроизвела три, следующих друг за другом, опасных подъёма уровня моря с занижением их максимумов на 40, 15 и 3 см, соответственно.

2. Результаты вейвлет-анализа рассчитанных и измеренных рядов уровня моря свидетельствовали, что во время опасных подъёмов уровня моря в начале декабря 2015 г. генерировались колебания с периодами, близкими к основной моде 26-часовых собственных колебаний Балтийского моря.

3. Произведённые в последние полвека намывы территорий не оказывают заметных изменений в положении уровенной поверхности Невской губы при закрытых затворах КЗС во время опасных подъёмов уровня моря, вызванных штормовыми нагонами. Дополнительные подъёмы уровня из-за намывов в Невской губе при закрытых в течение 12–48 ч затворах КЗС составляют 1–3 см, когда расход Невы был 2000 м<sup>3</sup>/с и 2–5 см, когда объём стока Невы составлял 4080 м<sup>3</sup>/с. Однако подъём уровня до 161 см у Горного института, при котором в Санкт-Петербурге фиксируются наводнения, происходит из-за намывов раньше на 1–2 ч.

4. Наибольшие дополнительные подъёмы уровня воды из-за намывов территорий отмечаются в дельте Невы, где при объёме её стока в 2000 м<sup>3</sup>/с в районе моста Бетанкура в Малой Неве наблюдался дополнительный подъём уровня в 20,5 см.

5. При максимальном для осенне-зимнего периода объёме стока Невы в 4080 м<sup>3</sup>/с, через 27 ч после закрытия затворов КЗС, в Невской губе у пункта Горный институт фиксируется опасный подъём уровня в 161 см, а через 48 ч — особо опасный подъём уровня в 240 см.

## Литература

1. Павловский А.А., Епифанова Н.Н., Шамируин В.И. О градостроительных особенностях формирования искусственных земельных участков Санкт-Петербурга // Охрана окружающей среды Санкт-Петербурга. № 4(22) декабрь 2021 г. 2021. С. 26–30.
2. Померанец К.С. О статистике наводнений в Петербурге // Метеорология и гидрология. 1999. № 8. С. 105–110.
3. Аверкиев А.С., Клеванный К.А. Определение траекторий и скоростей циклонов, приводящих к максимальным подъёмам воды в Финском заливе // Метеорология и гидрология. 2007. № 8. С. 55–63.
4. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. О пространственно-временной структуре и механизмах формирования невских наводнений // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 54–64.
5. Захарчук Е.А., Сухачёв В.Н., Тихонова Н.А. Механизмы опасных подъёмов уровня моря в Финском заливе. СПб.: Издательство «Петербург XXI век», 2017. 151 с.
6. Захарчук Е.А., Сухачёв В.Н., Тихонова Н.А. О пространственной структуре и распространении волн невских наводнений // Метеорология и гидрология. 2020. № 4. С. 42–53.
7. Захарчук Е.А., Сухачёв В.Н., Тихонова Н.А. Штормовые нагоны в Финском заливе Балтийского моря // Вестник СПбГУ. 2021, Т. 66. № 4. С. 781–805. doi:10.21638/spbu07.2021.408
8. Лабзовский Н.А. Непериодические колебания уровня моря. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 238 с.
9. Морской энциклопедический справочник: в двух томах. Том 2. Под ред. Н.Н. Исанина. Л.: Судостроение, 1986. 520 с.
10. Horsburgh K., Haigh I.D., Williams J. et al. “Grey swan” storm surges pose a greater coastal flood hazard than climate change // Ocean Dynamics. 2021. Vol. 71. P. 715–730. doi:10.1007/s10236-021-01453-0
11. Guérou A, Meyssignac B., Prandi P. et al. Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement uncertainty // Ocean Science. 2023. Vol. 19. P. 431–451.
12. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А., Сухачёв В.Н. Изменчивость уровня Балтийского моря. Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 20–22 сентября 2023 г. Том 2. Южный федеральный университет. Новочеркасск: Лик, 2023. С. 57–62.
13. Passaro M., Müller F.L., Oelsmann J. et al. Absolute Baltic Sea Level Trends in the Satellite Altimetry Era: A Revisit // Front. Mar. Sci. 2021. Vol. 8. 647607. doi:10.3389/fmars.2021.647607
14. Клеванный К.А., Колесов А.М., Мостаманди М.-С.В. Прогноз наводнений в Санкт-Петербурге и восточной части Финского залива в условиях работы комплекса защитных сооружений // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 61–70.
15. Клеванный К.А., Аверкиев А.С. Влияние работы комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений на подъём уровня воды в восточной части Финского залива // Научно-теоретический журнал «Общество × Среда × Развитие». 2011. № 1. С. 204–209.
16. Павловский А.А., Менжулин Г.В. Изменения климата и оценка перспективы использования в петербургском градостроительстве искусственных намывных территорий // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 593. 2019. С. 70–84.
17. Попов С.К., Гусев А.В., Фомин В.В. Вторичный максимум уровня моря в наводнениях в Санкт-Петербурге и его воспроизведение в численных моделях // Метеорология и гидрология. 2018. № 12. С. 48–60.
18. Zalesny V.B., Gusev A.V., Ivchenko V.O., Tamsalu R., Aps R. Numerical model of the Baltic Sea circulation // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2013. Vol. 28. N 1. P. 85–100. doi:10.1515/rnam-2013-0006

19. Zalesny V.B., Gusev A.V., Chernobay S. Yu. et al. The Baltic Sea circulation modelling and assessment of marine pollution // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2014. Vol. 29, N 2, P. 129–138. doi:10.1515/rnam-2014-0010
20. Brydon D., Sun S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // Journal of Geophysical Research-Oceans. 1999. Vol. 104. P. 1537–1540. doi:10.1029/1998jc900059
21. Яковлев Н.Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть I: Численная модель и среднее состояние // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 3. С. 383–398.
22. Smolarkiewicz P. A fully multidimensional positive definite advection transport algorithm with small implicit diffusion // Journal of Computational Physics. 1984. Vol. 54. P. 325–362. doi:10.1016/0021-9991(84)90121-9
23. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics // Journal of Physical Oceanography. 1997. Vol. 27. P. 1849–1867. doi:10.1175/1520-0485(1997)027<1849:AEVPMF>2.0.CO;2
24. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. P. 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803
25. Бельшиев А.П., Клеваницов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 264 с.
26. Методическое письмо по вероятностному анализу векторных временных рядов скорости течений и ветра. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 62 с.
27. Malakar P., Kesarkar A., Bhate J., Singh V., Deshamukhya A. Comparison of Reanalysis Data Sets to Comprehend the Evolution of Tropical Cyclones Over North Indian Ocean // Earth and Space Science. 2020. Vol. 7. e2019EA000978. doi:10.1029/2019EA000978
28. Li X., Yang J., Han G. et al. Tropical Cyclone Wind Field Reconstruction and Validation Using Measurements from SFMR and SMAP Radiometer // Remote Sensing. 2022. 14(16). 3929. doi:10.3390/rs14163929
29. Wübbler C., Krauss W. The two-dimensional seiches of the Baltic Sea // Oceanologica Acta. 1979. 4(2). P. 435–446.
30. Zakharchuk E.A., Tikhonova N.A., Zakharova E., Kouraev A.V. Spatiotemporal structure of Baltic free sea level oscillations in barotropic and baroclinic conditions from hydrodynamic modelling // Ocean Science. 2021. Vol. 17. I. 2. P. 543–559. doi:10.5194/os-17-543-2021
31. Сухачев В.Н., Захарчук Е.А., Клеваницов Ю.П., Тихонова Н.А. Изменчивость гидрологических характеристик в восточной части Финского залива по данным измерений на автоматической донной станции СПО ГОИН // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 3 (101). С. 97–108.

## References

1. Pavlovsky A.A., Epifanova N.N., Shamshurin V.I. On urban planning features of the formation of artificial land plots in St. Petersburg. *Environmental Protection of St. Petersburg*. No.4(22) December 2021, 2021, 26–30 (in Russian).
2. Pomeranets K.S. On flood statistics in St. Petersburg. *Meteorology and hydrology*. 1999, 8, 105–110 (in Russian).
3. Averkiev A.S., Klevanny K.A. Determining cyclone trajectories and velocities leading to extreme sea level rises in the gulf of Finland. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2007, 32, 514–519. doi:10.3103/S1068373907080067
4. Zakharchuk E.A., Tikhonova N.A. On the spatiotemporal structure and mechanisms of the Neva River flood formation. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2011, 8, 534–541. doi:10.3103/S106837391108005X
5. Zakharchuk E.A., Sukhachev V.N., Tikhonova N.A. Mechanisms of dangerous sea level rises in the Gulf of Finland. *St. Petersburg: Publishing house “Petersburg XXI century”*, 2017, 151 p. (in Russian).
6. Zakharchuk E.A., Tikhonova N.A., Sukhachev V.N. Spatial Structure and Propagation of the Neva Flood Waves. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020, 45(4), 245–253. doi:10.3103/s1068373920040044
7. Zakharchuk E.A., Sukhachev V.N., Tikhonova N.A. Storm surges in the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2021, 66(4). doi:10.21638/spbu07.2021.408 (in Russian).
8. Labzovsky N.A. Non-periodic fluctuations in sea level. *L.: Hydrometeoizdat*, 1971. 238 p.
9. The Marine Encyclopedic Handbook: in two volumes. Volume 2. Edited by N.N. Isanin, L.: *Shipbuilding*, 1986, 520 p. (in Russian).
10. Horsburgh K., Haigh I.D., Williams J. et al. “Grey swan” storm surges pose a greater coastal flood hazard than climate change. *Ocean Dynamics*. 2021, 71, 715–730. doi:10.1007/s10236-021-01453-0
11. Guérou A., Meyssignac B., Prandi P. et al. Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement uncertainty. *Ocean Science*. 2023, 19, 431–451.

12. Zakharchuk E.A., Tikhonova N.A., Sukhachev V.N. Variability of the Baltic Sea level. Water resources in the context of global challenges: environmental problems, management, monitoring. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. September 20–22, 2023, Southern Federal University. Novocherkassk, Lik*, 2023, 2, 57–62 (in Russian).
13. Passaro M., Müller F.L., Oelsmann J. et al. Absolute Baltic Sea Level Trends in the Satellite Altimetry Era: A Revisit. *Frontiers in Marine Science*. 2021, 8, 647607. doi:10.3389/fmars.2021.647607
14. Klevannyi K.A., Kolesov A.M., Mostamandi M.–S.V. Predicting the floods in St. Petersburg and the eastern part of the Gulf of Finland under conditions of operation of the flood prevention facility complex. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015, 40(2), 115–122. doi:10.3103/s1068373915020077
15. Klevannyi K.A., Averkiev A.S. The influence of the work of the complex of protective structures of St. Petersburg from floods on the rise of the water level in the eastern part of the Gulf of Finland. *Scientific and theoretical journal "Society – Environment – Development"*. 2011, 1, 204–209 (in Russian).
16. Pavlovsky A.A., Menzhulin G.V. Climate change and assessment of the prospects for the use of artificial alluvial territories in St. Petersburg urban planning. *Proceedings of the Voikov Main Geophysical Observatory*. 2019, 593, 70–84 (in Russian).
17. Popov S.K., Gusev A.V., Fomin V.V. The Secondary Sea Level Maximum during Floods in Saint Petersburg and Its Simulation with Numerical Models. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2018, 43(12), 827–836. doi:10.3103/s1068373918120038
18. Zalesny V.B., Gusev A.V., Ivchenko V.O., Tamsalu R., Aps R. Numerical model of the Baltic Sea circulation. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2013, 28, 1, 85–100. doi:10.1515/rnam-2013-0006
19. Zalesny V.B., Gusev A.V., Chernobay S. Yu. et al. The Baltic Sea circulation modelling and assessment of marine pollution. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2014, 29, 2, 129–138. doi:10.1515/rnam-2014-0010
20. Brydon D., Sun S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models. *Journal of Geophysical Research-Oceans*. 1999, 104, 1537–1540. doi:10.1029/1998jc900059
21. Yakovlev N.G. Reproduction of the large-scale state of water and sea ice in the Arctic Ocean in 1948–2002: Part I. Numerical model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009, 45(3), 357–371. doi:10.1134/s0001433809030098
22. Smolarkiewicz P. A fully multidimensional positive definite advection transport algorithm with small implicit diffusion. *Journal of Computational Physics*. 1984, 54, 325–362. doi:10.1016/0021-9991(84)90121-9
23. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics. *Journal of Physical Oceanography*. 1997, 27, 1849–1867. doi:10.1175/1520-0485(1997)027<1849:AEVPMF>2.0.CO;2
24. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, 146, 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803
25. Belyshev A.P., Klevantsov Yu.P., Rozhkov V.A. Probabilistic analysis of sea currents. *L., Hydrometeoizdat*, 1983, 264 p. (in Russian).
26. Methodical letter on the probabilistic analysis of vector time series of current and wind velocity. *L.: Hydrometeoizdat*, 1984, 62 p. (in Russian).
27. Malakar P., Kesarkar A., Bhate J., Singh V., Deshamukhya A. Comparison of Reanalysis Data Sets to Comprehend the Evolution of Tropical Cyclones Over North Indian Ocean. *Earth and Space Science*. 2020, 7, e2019EA000978. doi:10.1029/2019EA000978
28. Li X., Yang J., Han G. et al. Tropical Cyclone Wind Field Reconstruction and Validation Using Measurements from SFMR and SMAP Radiometer. *Remote Sensing*. 2022, 14(16), 3929. doi:10.3390/rs14163929
29. Wübbler C., Krauss W. The two-dimensional seiches of the Baltic Sea. *Oceanologica Acta*. 1979, 4(2), 435–446.
30. Zakharchuk E.A., Tikhonova N.A., Zakharova E., Kouraev A.V. Spatiotemporal structure of Baltic free sea level oscillations in barotropic and baroclinic conditions from hydrodynamic modelling. *Ocean Science*. 2021, 17(2), 543–559. doi:10.5194/os-17-543-2021
31. Sukhachev V.N., Zakharchuk E.A., Klevantsov Yu.P., Tikhonova N.A. Variability of hydrological characteristics in the eastern part of the Gulf of Finland according to measurements at the automatic bottom station SPO GOIN. *Problems of the Arctic and Antarctic*. 2014, 3(101), 97–108 (in Russian).

## Об авторах

- ТИХОНОВА Наталья Александровна, доцент кафедры океанологии, Институт наук о Земле СПбГУ; заведующий лабораторией, Санкт-Петербургское отделение ГОИ им. Н.Н. Зубова, кандидат географических наук, ORCID: 0000-0002-4546-4920, WoS ResearcherID: I-4647-2015, Scopus AuthorID: 11239410500, SPIN-код: 9870-7279, e-mail: i@ntikhonova.ru
- ЗАХАРЧУК Евгений Александрович, заведующий кафедрой океанологии, Институт наук о Земле СПбГУ, доктор географических наук, ORCID: 0000-0001-6079-5739, WoS ResearcherID: N-1644-2013, Scopus AuthorID: 6603158329, SPIN-код: 9870-7279, e-mail: eazakharchuk@yandex.ru

*Тихонова Н.А., Захарчук Е.А., Гусев А.В., Травкин В.С., Павловский А.А.*  
*Tikhonova N.A., Zakharchuk E.A., Gusev A.V., Travkin V.S., Pavlovsky A.A.*

ГУСЕВ Анатолий Владимирович, старший научный сотрудник ИВМ РАН, ФГБУ «ГОИН» и ИО РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-6463-3179, Scopus AuthorID: 56828803500, WoS ResearcherID A-8528-2014, SPIN-код: 1387-3344, e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com

ТРАВКИН Владимир Станиславович, научный сотрудник, ORCID: 0000-0002-7254-9313, WoS ResearcherID: HPE-4729-2023, Scopus AuthorID: 57509420800, SPIN-код: 4395-1208, e-mail: vtravkin99@gmail.com

ПАВЛОВСКИЙ Артем Александрович, и. о. заведующего кафедрой климатологии и мониторинга окружающей среды, Институт наук о Земле СПбГУ, доктор географических наук, ORCID: 0000-0002-3809-9355, Scopus AuthorID: 36614391300, SPIN-код: 4570-0930, pa1@yandex.ru