

УДК 551.435.3

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ПЕСЧАНОГО ПЛЯЖА В СЛОЖНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 2023 г. И. Г. Кантаржи*

*Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет, Москва, Россия*

**e-mail: kantardgi@yandex.ru*

Поступила в редакцию 26.11.2022 г.

После доработки 07.12.2022 г.

Принята к публикации 16.12.2022 г.

Исследуются изменения береговой зоны под воздействием течений различной природы и ветровых волн. В качестве объекта рассматривается песчаный пляж, расположенный в акватории “Парка 300-летия Санкт-Петербурга”, Невская губа Финского залива Балтийского моря. Пляж подвергается активному воздействию ветровых волн и в итоге размывается с интенсивностью отступления берега примерно 4 м в год. Для численного моделирования используется комплекс моделей: SWAN – ветроволновая модель и COASTOX-UN – двумерная модель течений, транспорта наносов и переформирования дна. Была разработана модель Невской губы и устья р. Невы от Комплекса защитных сооружений (КЗС) на западе до створа р. Невы в районе Литейного моста на востоке. На основе реанализа данных по ветру были отобраны за пятилетний период с 2014 по 2018 гг. 36 сильных штормов, для последовательности которых проводилось численное моделирование волн, течений и литодинамических процессов. Получены балансы намывов и размывов после десятилетнего моделируемого периода по секторам пляжа. Для верификации результатов используются спутниковые снимки района моделирования, установлено, что модель адекватно описывает основные наблюдаемые тенденции в развитии пляжа.

Ключевые слова: литодинамические процессы, динамика пляжа, волны, течения, численное моделирование, спутниковые снимки

DOI: 10.31857/S0030157423060059, **EDN:** QMLYJB

ВВЕДЕНИЕ

Динамика песчаных берегов зависит от волн, течений, колебаний уровня, возможного влияния береговых гидротехнических сооружений. Основным методом прогноза литодинамических процессов и соответствующих морфодинамических изменений является математическое моделирование. Возможности физического моделирования для решения таких задач ограничены по известным причинам.

При математическом моделировании литодинамических процессов на пляжах в береговой зоне серьезной проблемой является валидация результатов. Для этой цели не может быть использовано физическое моделирование. Можно использовать натурные данные – исторические данные, данные отдельных измерений, данные космических наблюдений.

Развитие технологии математического моделирования пляжей является актуальной задачей, чему посвящена настоящая работа.

Распространенная практика математического моделирования режима волн, течений и перефор-

мирования дна в мелководных водоемах на многолетний период – использование двумерной модели течений, транспорта наносов и морфодинамики берега в связке с моделью ветровых волн.

Примеры известных программных комплексов, в которых объединены модели ветровых волн, течений, транспорта наносов и переформирования дна:

- Программный пакет Mike 21, разработанный компанией DHI, Дания [13];

- Интегрированный набор численных моделей CMS, разработанных US Army Corps of Engineers [14], входящих в программный комплекс SMS от компании Aquaveo, США [15].

В программном пакете Mike 21 ветровые волны в водоемах моделируются спектральной волновой моделью Mike 21 SW [11]. Течения и транспорт наносов – моделью MIKE 21 Flow Model FM [12]. Волновые параметры могут быть промоделированы на весь исследуемый период и затем использоваться моделью течений и транспорта наносов. Либо модели могут работать взаимосвязано, поэтапно, и волновая модель будет использовать

рельеф, обновленный после переформирования дна, а транспортная модель на новом этапе — пересчитанные волновые параметры.

Подобным образом функционирует комплекс численных моделей CMS: ветровые волны рассчитываются спектральной волновой моделью CMS-Wave [21], течения, транспорт наносов и переформирование дна — моделью CMS-Flow [23].

В настоящей работе для решения задач динамики пляжа используется модель ветровых волн SWAN в комплексе с двумерной моделью течений, транспорта наносов и переформирования дна COASTOX-UN.

SWAN — спектральная волновая модель открытого доступа по изучению волн в открытом море и в прибрежных водах, получившая свое развитие в Дельфтском Университете Технологий, Нидерланды [8, 22]. SWAN — волновая модель третьего поколения для получения реальных оценок волновых параметров в прибрежных зонах шельфа по данным ветрового поля, батиметрии и течений на основе численного решения уравнения баланса плотности волнового действия с источниками и стоками.

Модель COASTOX-UN [1–3, 18–20] была разработана для моделирования течений, переноса взвешенных наносов и морфодинамики в речных системах и прибрежных водах морей под действием речного стока, ветра и атмосферного давления, приливов и радиационных напряжений, созданных ветровым волнением.

Модель основана на двумерных нелинейных уравнениях мелкой воды, двумерных уравнениях адвективно-диффузионного переноса наносов с источниками и стоками, уравнении размыва-осаждения и баланса массы донного материала. Донные и взвешенные наносы в модели описываются единым образом, аналогично неравновесной модели транспорта наносов в CMS. Локальная интенсивность процессов осаждения и размыва дна принимается пропорциональной разности мгновенной и равновесной концентрации наносов. Для расчета последней используется библиотека известных формул современной теории транспорта прибрежных наносов. При этом для несвязных наносов, песчаных и близким к ним по размерам фракций в качестве основной используется формула Van Rijn [24, 25], а для галечных наносов — формула Camenen–Larsen [9, 10].

Уравнения модели решаются численно методами конечных объемов на неструктурированных сетках с треугольными ячейками. Алгоритмы численного решения распараллелены для ускоренных вычислений на многоядерных компьютерных системах и графических процессорах (GPU).

Модель верифицирована на аналитических решениях уравнений, лабораторных тестах, полевых измерениях. Прошла апробацию при выпол-

нении инженерных проектов в России, Камбодже, Сингапуре, США.

При моделировании переформирования дна под воздействием ветрового волнения комплексом моделей SWAN и COASTOX-UN, модели выполняют вычисления поэтапно. SWAN рассчитывает параметры ветрового волнения на исходном рельефе и передает в COASTOX-UN значения периода, направления и высоты значительных волн, а также компоненты волновых напряжений. COASTOX-UN использует радиационные напряжения при расчете течений и вычисляет равновесную концентрацию наносов с учетом параметров волн. Равновесная концентрация затем используется в источниковых слагаемых уравнений переноса наносов и баланса массы донного материала. Когда изменение дна достигает определенной величины, обновленный рельеф передается в модель SWAN и используется для пересчета волновых полей на новом этапе. Вычисления продолжают до завершения периода моделирования.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования рассматривается пляж базы водных видов спорта в Приморском районе, расположенный на акватории Невской губы Финского залива Балтийского моря, в ее северо-восточной части, вблизи береговой черты “Парка 300-летия Санкт-Петербурга” (рис. 1). Она простирается вдоль побережья парка от Лахтинской гавани на западе до Яхтенного моста на востоке.

Побережье “Парка 300-летия Санкт-Петербурга” от Лахтинской гавани до Яхтенного моста представляет собой песчаный пляж шириной 50–80 м (рис. 2). С запада со стороны гавани пляж огорожен дамбой из каменных валунов. Дамба выступает в губу на расстояние около 80 м, имеет поворот в восточном направлении около 40 м. Она представляет только частичную защиту западной части пляжа от ветровых волн и размыва. Центральная и восточная части пляжа подвергаются активному воздействию ветровых волн и волновой эрозии. Вдольбереговой транспорт наносов и вынос песка в восточном направлении ничем не ограничены. В результате размыва берег отступает (рис. 2) на величину до 4 м в год согласно материалам инженерно-гидрометеорологических изысканий.

Морской канал, служащий для прохода морских судов с большой осадкой в порт Санкт-Петербург, пересекает Невскую губу с востока на запад от устья Большой Невы до судопропускного сооружения С-1 у о. Котлин. Его ширина около 80–100 м и глубина около 14 м. Помимо Морского канала в губе имеются еще несколько судоходных трасс — Северный фарватер, Ломоносовский



Рис. 1. Схема расположения изучаемого района “База водных видов спорта в Приморском районе”.



Рис. 2. Спутниковый снимок изучаемого пляжа 2020 г. Зеленая линия показывает контур берега в 2009 г.

фарватер (между Ломоносовым и Кронштадтом), Петродворцовый фарватер (от Петродворца до Морского канала), подходной канал на Невском бере до морского пассажирского вокзала.

Рельеф дна влияет на распределение течений в Невской губе. Помимо рельефа, режим течений в Невской губе определяется рядом взаимодействующих факторов: стоком р. Невы, ветровыми сгонно-нагонными явлениями, волновыми течениями. Последние особенно существенны в прибрежной зоне. Они оказывают влияние на транспорт наносов и переформирование побережья Невской губы.

До строительства Комплекса защитных сооружений (КЗС) большая часть твердого материала транспортировалась в Невскую губу из восточной части Финского залива. После строительства КЗС донные осадки поступают в губу, в основном, под воздействием стокового течения р. Невы. По мере снижения скорости стокового течения с востока на запад в губе образуются песчаные (мелко- и тонкозернистые пески) и алевро-песчаные (алевритовые пески, песчаные алевриты) осадки аллювиально-морского происхождения.

В центральной части Невской губы дно сложено в основном мелкими заиленными песками. Прибрежные районы представлены песками различных фракций — от крупнозернистых вблизи уреза до мелко-тонкозернистых на глубинах 1.5–2.0 м.

Гранулометрические исследования проводились во время инженерных изысканий по объекту: “Яхт-клуб со встроенной трансформаторной подстанцией” [5]. Район изысканий, западная часть Крестовского острова, находится в непосредственной близости от площадки исследований. По результатам изысканий, дно обследуемой акватории сложено песком с преобладающим диаметром 0.10–0.25 мм.

При моделировании переформирования дна был задан для моделирования медианный диаметр частиц донных отложений равный 0.1 мм.

Заметную роль в транспорте наносов в мелководной Невской губе играют волновые воздействия. Их влияние особенно существенно в прибрежной зоне.

Проникновению ветрового волнения из Финского залива в Невскую губу мешает о. Котлин и КЗС. Однако достаточно активное ветровое волнение развивается в самой Невской губе. В период свободный ото льда с апреля по ноябрь, 221 сутки в году в среднем, около 90% времени в губе наблюдается волнение и лишь 10% времени — штиль. Довольно значительное волнение может продолжаться 3–4 дня.

В естественном состоянии северо-восточная часть акватории Невской губы, где расположен рассматриваемый участок, мелководна. Средняя глубина здесь составляла около 3–4 м и мало изменялась по площади.

По данным навигационных карт 1874 и 1967 гг. в месте расположения участка исследования имела Собакина отмель с отметками дна 0...–2 м. Эта отмель достигла устойчивого состояния и не претерпевала деформаций.

В современном состоянии значительные карьерные выемки, проведенные на акватории Невской губы и устьевого бара р. Невы в последние десятилетия, коренным образом изменили ситуацию. Теперь в северо-восточной части губы, в непосредственной близости от объекта проектирования имеется большое количество хаотически расположенных карьерных выемок донного материала.

В результате карьерных выемок рельеф дна усложнился, уклоны подводной части береговых склонов увеличились, образовались условия для переформирования берегов под воздействием волн и течения.

МОДЕЛЬ НЕВСКОЙ ГУБЫ С ДЕТАЛИЗАЦИЕЙ В РАЙОНЕ ПЛЯЖА

С учетом изложенной характеристики района исследования для прогноза режима течений и переформирования дна была разработана изолированная модель Невской губы и устья реки Невы от КЗС на западе до створа р. Невы в районе Литейного моста на востоке.

Для волновой модели и модели течений и переформирования дна были разработаны единые расчетные сетки.

Для создания сеток использовалась Community Edition версия программного пакета SMS 13.1 [3]. Основой для сеток стала цифровая модель Невской губы, построенная в пакете SMS.

Источником батиметрических данных для модели Невской губы служили навигационные карты Невской губы масштаба 1 : 8000, 1 : 12000 и 1 : 22000. Карты были оцифрованы, точки со значениями глубин приведены к декартовой системе координат в географической проекции UTM, зона 36. Границы берегов Невской губы, о. Котлин, островов в устье Невы также были оцифрованы с навигационных карт, уточнены по современным космическим снимкам и добавлены к единой цифровой модели Невской губы.

На основе границ берегов Невской губы были созданы многоугольники расчетных областей. Распределение вершин на их границах соответствует размерам треугольных ячеек создаваемых расчетных сеток. Вдоль берега залива и островов расстояние между вершинами 20–30 м, вдоль берега исследуемого пляжа расстояние уменьшается до 5 м. В центральной части Невской губы базовый размер ячеек был задан равным 500 м. Сгущение расчетных сеток также было задано вдоль фарватеров и Морского канала, размер ячеек здесь уменьшается до 50 м.

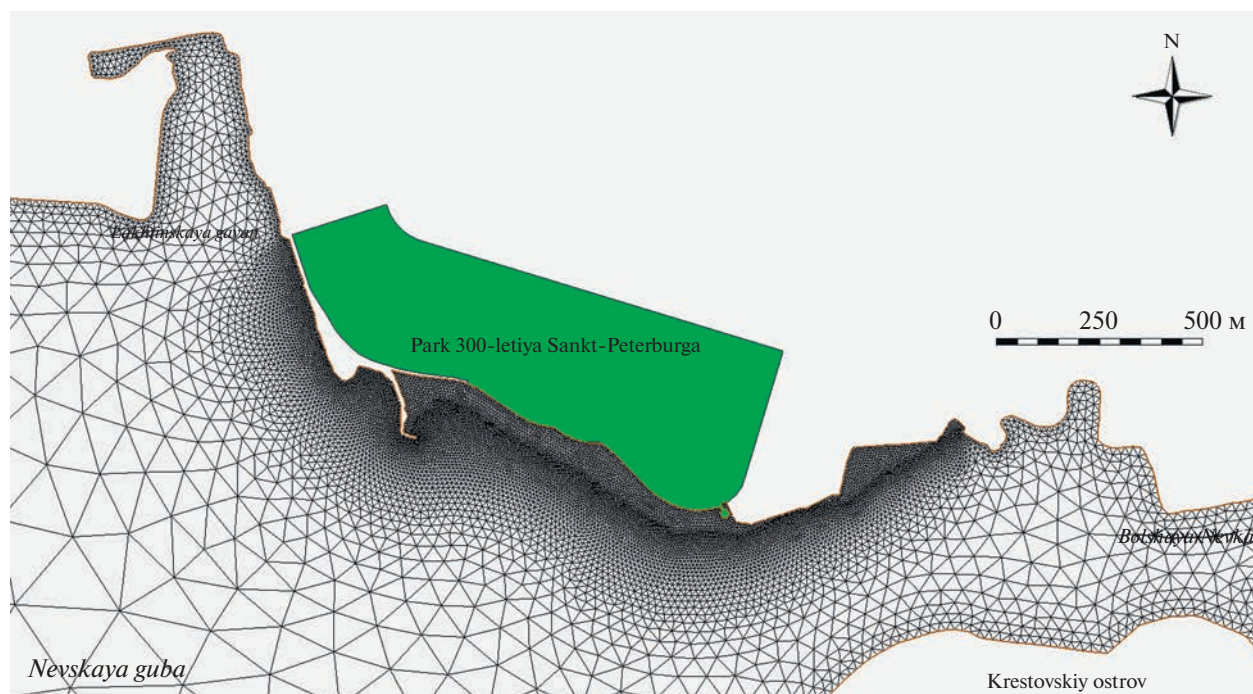


Рис. 3. Расчетная сетка исследуемого района.

На основе построенных многоугольников с помощью пакета SMS, были сгенерированы расчетные сетки. Детализация расчетной сетки показана на рис. 3.

СЦЕНАРИИ ПОЛЯ ВЕТРОВ НАД АКВАТОРИЕЙ НЕВСКОЙ ГУБЫ И В РАЙОНЕ БЕРЕГОВОЙ ЧЕРТЫ ИССЛЕДУЕМОГО ПЛЯЖА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

Для моделирования ветрового волнения были использованы значения скорости и направления ветра из базы реанализа NEWA (New European Wind Atlas, www.neweuropeanwindatlas.eu) за период с 2014 по 2018 гг. Ветра из этой базы имеют полчасовую дискретность по времени и хорошую детализацию в пространстве — около 3 км. В формировании ветрового поля над областью расчетной сетки было задействовано около 80 “ветровых” точек. Стоит отметить, что для других доступных ветровых баз реанализа (NCEP2, ERA-40) для акватории Невской губы этот показатель был равен 4–6 точкам.

Для отбора дат штормовых сценариев были проанализированы ветровые данные за усредненный “безледный” период с апреля по ноябрь (включительно) в 9 точках, которые покрывают область исследуемого пляжа. Критерием выбора даты шторма было условие превышения скорости ветра значения 12.5 м/с хотя бы в одной точке из 9 и условие попадания направления ветра в интер-

вал 170° – 271° , т.е. западные, юго-западные и южные направления. Далее анализировались скорости ветра из соседних с выбранными датами, и период шторма расширялся до тех пор, пока скорость ветра не падала ниже 7 м/с или направление не выходило из выбранного интервала. Шторма длительностью до 10 временных точек (по 30 мин) не рассматривались.

Таким образом были отобраны за 5-летний период с 2014 по 2018 гг. следующие 36 штормов. Даты и характеристики штормов (максимальная скорость ветра и среднее направление ветра в момент максимальной скорости) приведены в табл. 1 (даты записаны в формате ггггммдд.чч).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА АКВАТОРИИ НЕВСКОЙ ГУБЫ И РАСЧЕТ РЕЖИМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНЕНИЯ НА ПОДХОДЕ К ПЛЯЖУ

Для расчета характеристик ветровых волн использовалась численная спектральная модель ветрового волнения в прибрежной зоне Делфтского технологического университета SWAN ver. 41.31A (Simulating WAVes Nearshore). Физико-географическое положение рассматриваемого района, расположенного в северо-восточной части Невской губы, приводит к наибольшей высотам волн при сильных ветрах с направлениями от южного до западного, так как в этих случаях разгон волн будет максимальным.

Таблица 1. Даты выбранных для моделирования максимальных штормов за 5-летний период 2014–2018 гг. и характеристики максимальных ветров в эти периоды (направление ветра измеряется от севера по часовой стрелке)

N	Дата начала шторма	Дата конца шторма	Максимальная скорость ветра, м/с	Среднее направление ветра, °
1	20140702.03	20140704.20	13.84	262.16
2	20140817.23	20140823.03	14.04	188.24
3	20140923.15	20140929.15	13.98	197.89
4	20150408.00	20150413.07	15.53	255.07
5	20150422.10	20150424.23	17.22	216.64
6	20150428.07	20150430.13	15.93	203.91
7	20150523.06	20150524.17	15.09	259.03
8	20150603.04	20150612.00	14.86	221.84
9	20150723.21	20150726.08	14.55	235.82
10	20150826.11	20150830.17	14.11	154.15
11	20151001.00	20151003.15	17.37	219.28
12	20151021.16	20151023.08	13.13	198.26
13	20160510.23	20160511.21	12.74	178.04
14	20160608.09	20160613.14	16.83	252.60
15	20160617.01	20160620.16	14.44	187.91
16	20160703.16	20160708.03	15.98	233.28
17	20160827.00	20160831.05	16.30	205.96
18	20160906.11	20160908.22	14.08	273.94
19	20160928.09	20161002.01	16.26	224.22
20	20161106.00	20161110.09	13.51	224.56
21	20161124.00	20161126.10	16.47	185.34
22	20170425.11	20170429.17	14.19	211.36
23	20170530.22	20170603.19	15.13	270.17
24	20170626.00	20170628.21	16.29	200.58
25	20170913.08	20170917.06	13.86	179.92
26	20171002.07	20171005.15	14.73	213.60
27	20171025.10	20171029.07	13.44	227.79
28	20180406.10	20180407.16	13.63	180.93
29	20180604.03	20180608.18	13.38	174.52
30	20180618.11	20180623.05	19.03	196.12
31	20180630.00	20180702.18	13.71	171.02
32	20180805.09	20180807.18	15.12	149.97
33	20180911.13	20180914.00	17.42	273.86
34	20180925.00	20180930.23	18.80	202.49
35	20181004.00	20181006.18	14.54	200.06
36	20181128.11	20181130.23	13.58	213.85

Выполнено сравнение высот волн, рассчитанных по методике СП 38.13330.2018 [4] и полученных на модели SWAN в расчетной точке. Значения средних высот волн, рассчитанных разными методами, различаются не более чем на 10 см, а значения периодов не больше, чем на 1 с [16].

Для иллюстрации характера волновых полей при различных направлениях было выполнено численное моделирование для трех направлений Ю, ЮЗ, З и экстремальных скоростей ветра 1% обеспеченности из отчета по ИГМИ [6]. Соответствующие значения скорости ветра составляют:

17.9, 23.4 и 24.8 м/с. Все сценарии моделирования при уровне воды обеспеченностью 1% – 1.96 м БСВ.

На рис. 4 представлены полученные поля значительных высот волн для одного из трех направлений ветра.

Для моделирования литодинамических процессов были просчитаны каждый из 36 штормовых периодов, приведенных в табл. 1. На входе задавался ветер с реанализа NEWA и уровень моря, взятый из измерений на станции Санкт-Петербург (<http://www.marineinsitu.eu/dashboard/> [17]).

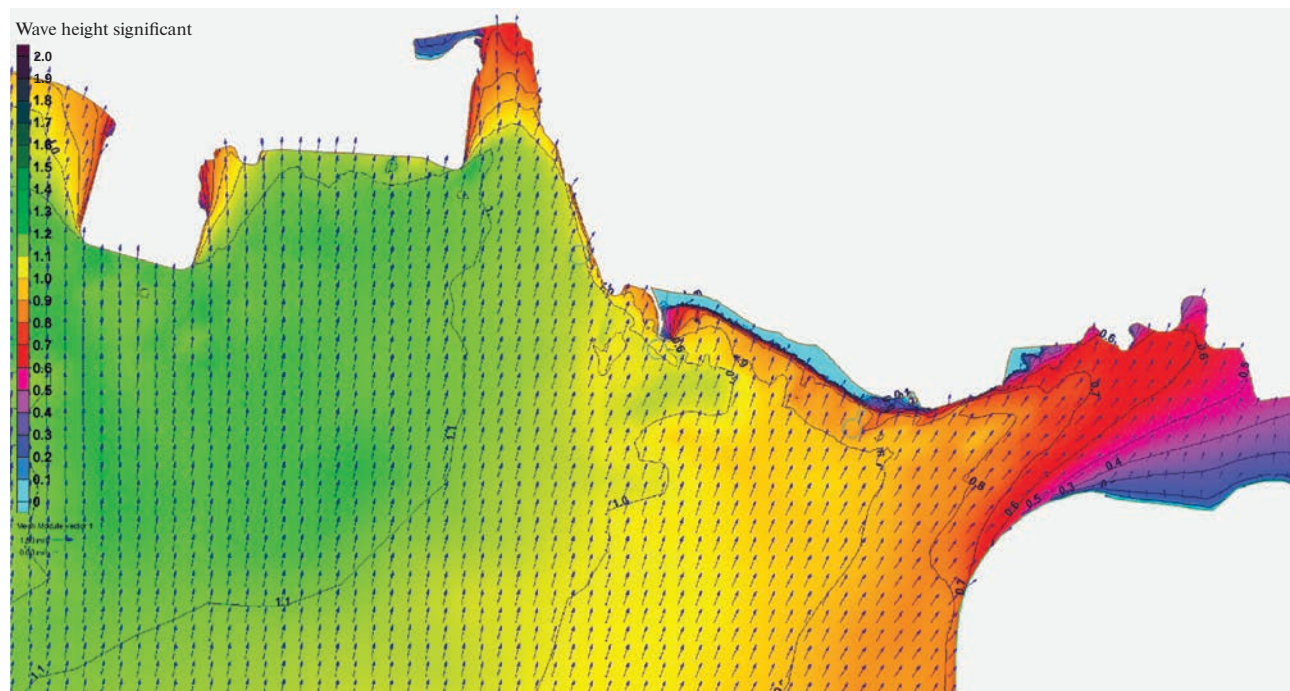


Рис. 4. Поле значительных высот волн. Естественные условия, ветер южный, 17.9 м/с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА АКВАТОРИИ НЕВСКОЙ ГУБЫ В РАЙОНЕ ИССЛЕДУЕМОГО ПЛЯЖА

Течения в Невской губе формируются под влиянием стока р. Невы, ветра, нагонных явлений, штормовых волн.

Для исследования режима течений использовалась расчетная сетка, описанная ранее. Большая часть боковых границ сеток вдоль берегов залива и островов — закрытые, с условием свободного прохождения для течения и нормальной компонентой скорости, равной нулю. Открытыми являются граница на востоке по створу Невы около Литейного моста — на ней для моделирования задается расход реки. И западные границы на пропускных створах КЗС. На них задается уровень свободной поверхности воды в м, Балтийской системы высот.

Поскольку данные срочных измерений расхода воды в Неве не находятся в свободном доступе, в качестве значений расхода воды использовались средние месячные величины расхода на посту Новосаратовка из свободной базы данных по расходу рек Глобального центра данных о стоке.

При моделировании исторических штормов значения уровня на створах КЗС задавались по измерениям уровня воды на посту Кронштадт, полученными из базы данных морской службы Copernicus Marine Service [7], куда они передаются Росгидрометом. Это позволяет моделировать ветровые нагоны без включения в расчетную об-

ласть части Балтийского моря, поскольку длинная нагонная волна начинает формироваться западнее Невской губы в Финском заливе и Балтийском море.

Для верификации модели течений использовались данные наблюдений за течениями в Невской губе вдоль судоходных фарватеров и в устье Невы. А также данные измерений скорости течения, выполненные в районе западной части Крестовского острова в ходе проведения Инженерных изысканий по объекту “Яхт-клуб со встроенной трансформаторной подстанцией” [5].

Согласно наблюдениям, наибольшие скорости стоковых течений наблюдаются в восточной части губы на фарватерах. Здесь течение на выходе из дельты достигает 0.3–0.4 м/с. Далее оно уменьшается примерно на 0.06–0.07 м/с на каждый километр.

Удаляясь от фарватеров, примерно за 3-метровой изобатой водный поток становится более однородным, а резкие различия в распределении скоростей сглаживаются. В центральной части Невской губы скорость стокового течения составляет 0.06 м/с, у северного побережья — 0.04 м/с, а южнее Морского канала — около 0.03 м/с. По фарватеру Морского канала воды движутся быстрее — со скоростью 0.08–0.10 м/с.

Моделирование течений было выполнено на расчетной сетке для естественных условий побережья в штилевых условиях, без ветра и волн, со среднегодовым расходом Невы равным

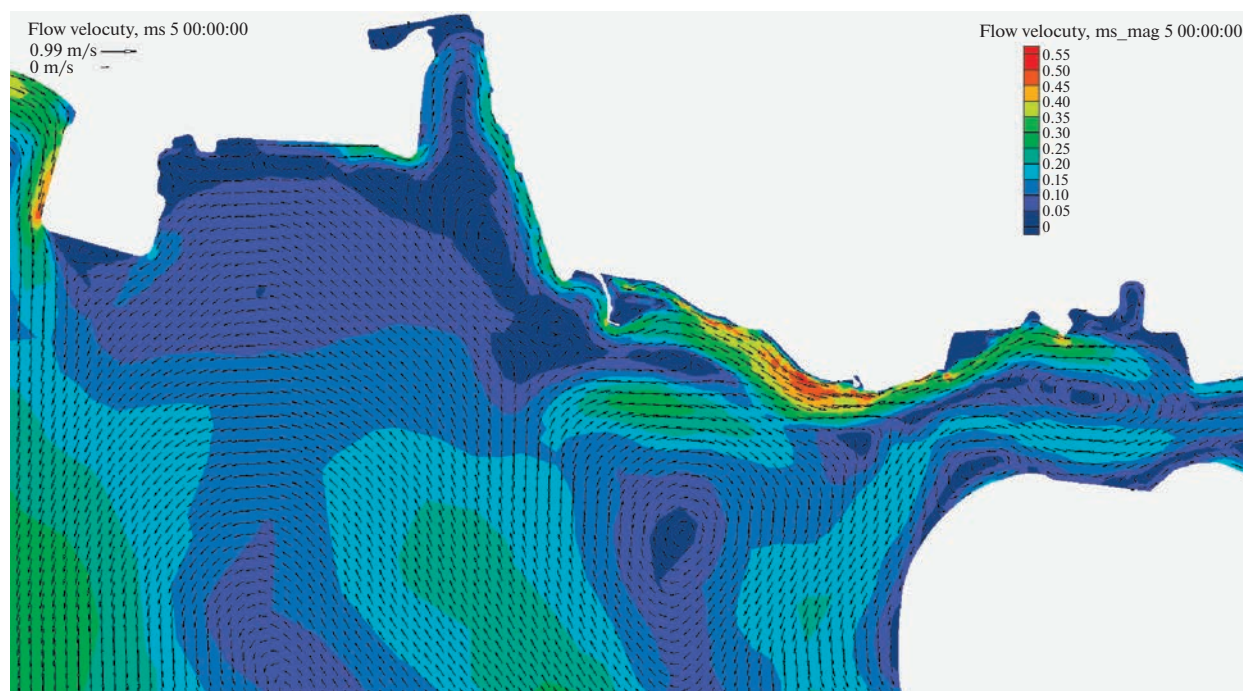


Рис. 5. Распределение течений в районе пляжа во время западного шторма. 1% обеспеченности, скорость ветра 24.8 м/с.

2510 м³/с и со среднемесячными расходами согласно измерениям на посту Новосаратовка.

Пример результатов численного моделирования полей течений для определенных ветровых условий показан на рис. 5.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Для анализа интенсивности литодинамических процессов моделируемого участка побережья проанализированы спутниковые снимки 2013–2020 гг.

Анализ показывает тенденции и интенсивность литодинамических процессов в последние годы, согласующиеся с результатами инженерно-гидрометеорологических изысканий: наибольшая интенсивность процессов размыва имеет место в восточной части пляжа, она постепенно

снижается в центральной и западной части пляжа при межгодовой изменчивости размывов/намывов возле насыпной дамбы, фиксирующей пляж с запада. В настоящее время нет возможности восстановить батиметрию подводной части пляжа по состоянию на 2013 г., представленные в этой работе расчеты литодинамики стартуют с батиметрии 2020 г. на основе характеристик штормов после 2013 г. Поэтому они не могут в точности воспроизвести реальную картину эволюции пляжа, но их сравнение со спутниковыми снимками важно для анализа физической достоверности результатов моделирования.

Сценарий десятилетнего моделирования трансформации пляжа при штормовом воздействии был сформирован полями волн и течений, рассчитанных для 36 штормов периода 2014–2018 гг. (табл. 1), повторенных дважды. Исходная для расчета батиметрия и отметки прибрежной зоны

Таблица 2. Объемы размыва и намытого материала на пляже по секторам 1–5 за 10-летний период

	Объем зон размыва, м ³	Объем зон намыва, м ³	Сумма изменений объема, м ³
Сектор 1	–571	637	66
Сектор 2	–12820	109	–12711
Сектор 3	–617	32	–584
Сектор 4	–482	11	–472
Сектор 5	–1193	347	–846
Все сектора	–15.683	1.136	–14.547
Сектора 1 + 2 + 3	–14.007	0.778	–13.229

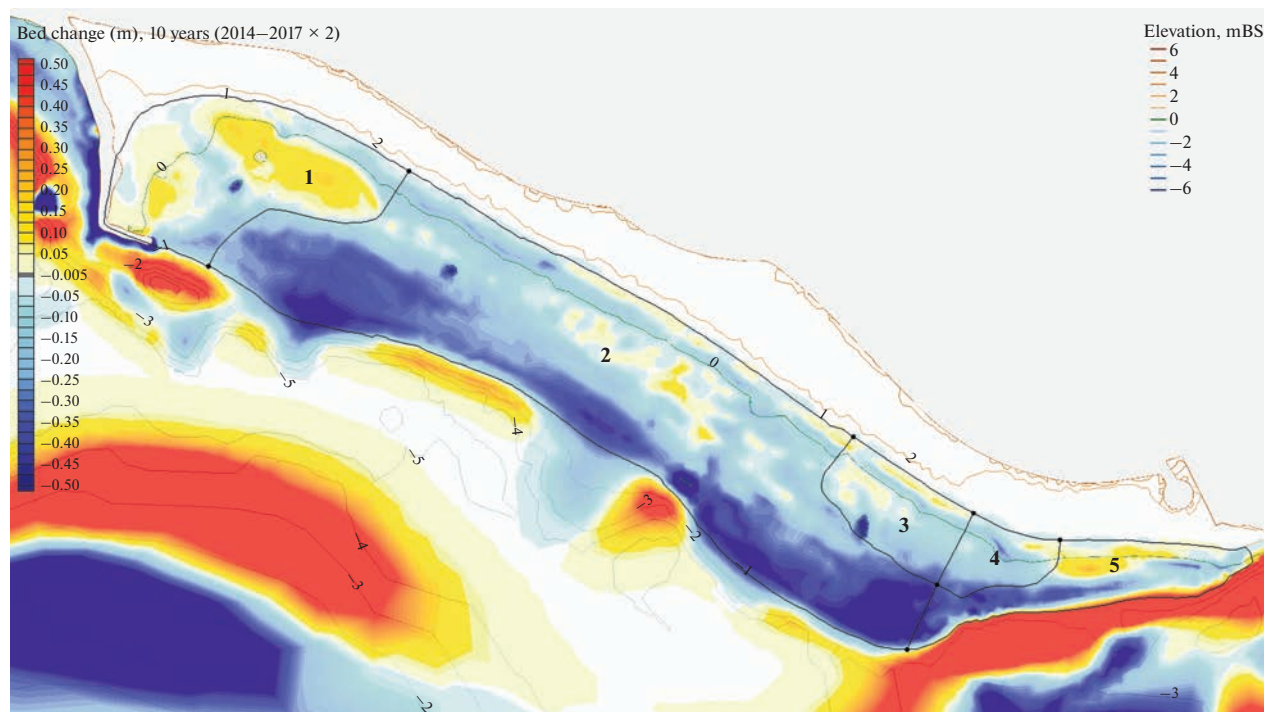


Рис. 6. Изменения глубин и отметок берегов за 10 лет по сравнению с начальными отметками (красная часть шкалы — намыв, голубая часть шкалы — размыв).

задавались, как указано выше, по данным инженерных изысканий 2000 г.

Баланс намывов и размывов после 10-летнего моделируемого периода по секторам пляжа (рис. 6) представлен в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью проведенного исследования являлось изучение динамики размыва пляжа под действием волн и течений. Исследовался песчаный пляж в акватории “Парка 300-летия Санкт-Петербурга”, который интенсивно размывается последнее время.

Использована современная технология моделирования, основанная на совместном применении волновой модели открытого доступа SWAN и двухмерной модели гидродинамики течений, генерируемых ветром, приливами и радиационными напряжениями ветровых волн, переноса взвесей и переформирования дна и берегов — COASTOX.

Адаптированный для Невской губы и акватории “Парка 300-летия Санкт-Петербурга” комплекс численных моделей позволил проводить расчеты многолетней литодинамики пляжной зоны Парка в результате последовательности 36 отдельных сильных штормов, выбранных по штормовым характеристикам ветра в период 2014–2018 гг. Из выбранных штормов были рассчитаны штормовые поля волн за 10-летний период.

Исследование показало, что наиболее интенсивный размыв наблюдается в восточной части пляжа. В западной части пляжа восточнее существующей каменно-набросной буны отмечены небольшие разнонаправленные от года к году размывы. Центральная часть пляжа стабильно размывается. Сопоставление результатов моделирования с данными анализа спутниковых снимков динамики береговой полосы в 2014–2020 гг. показало, что модель адекватно описывает основные наблюдаемые тенденции в развитии пляжа для гидрометеорологических условий рассматриваемого периода.

Результаты работы могут быть использованы для определения инженерных мер по стабилизации пляжа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Леонтьев И.О., Шахин В.М. Математическое моделирование береговых процессов Имеретинской низменности для обоснования берегозащитных мероприятий // Гидротехническое строительство. 2011. № 10. С. 22–29.
2. Кантаржи И.Г., Мордвинцев К. П. Численное и физическое моделирование в МГСУ морских портовых гидротехнических сооружений // Наука и безопасность. 2015. № 32 (15). С. 2–16.
3. Кивва С.Л., Железняк М.И., Коломиец П.С., Сорокин М.В. Математическое моделирование наката волн и берегового размыва Имеретинского побережья во время экстремальных штормов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. V. 7. Is. 2. P. 77–84.

4. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*. СП 38.13330.2018. Свод правил. М.: 2019.
5. Отчет 186-19-ИГМИ. Технический отчет по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий для подготовки проектной документации по объекту: “Яхт-клуб со встроенной трансформаторной подстанцией” по адресу: г. Санкт-Петербург, Южная дорога, участок 21 (Невская губа Финского залива (Балтийское море) в районе западной части Крестовского острова). СПб.: ЗАО “ЛенТИСИЗ”, 2019.
6. Отчет 1290–2020. ИГМИ. Технический отчет по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий. АО “Фирма УНИКОМ”, 2020.
7. Отчет о НИР “Оценка влияния гидротехнических сооружений на гидродинамический режим акватории Невской губы, прилегающей к “Парку 300-летия Санкт-Петербурга”. Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2022. 30 с.
8. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Part 1. Model description and validation // *Journal of Geophysical Research*. 1999. № 104 (C4). P. 7649–7666.
9. Camenen B., Larson M. A bed load sediment transport formula for the nearshore // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005. № 63. P. 249–260.
10. Camenen B., Larson M. A unified sediment transport formulation for coastal inlet applications, ERDC/CHL-TR-06-7. US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2007.
11. DHI. MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation, MIKE by DHI. Hørsholm, Denmark. 2017. 56 p.
12. DHI. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. MIKE by DHI. Hørsholm, Denmark. 2017. 64 p.
13. <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-3>.
14. <https://cirpwiki.info/wiki/CMS>.
15. <https://www.xmswiki.com/wiki/SMS:SMS>.
16. <https://www.compositerunoff.sr.unh.edu/html/Polygons/P6972430.html>.
17. <http://www.marineinsitu.eu/dashboard/>.
18. Kantardgi I., Zheleznyak M., Demchenko R. et al. Modeling of Nonlinear Hydrodynamics of the Coastal Areas of the Black Sea by the Chain of the Proprietary and Open-Source Models // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2014. V. 16.
19. Kantardgi I.G., Zheleznyak M.J. Laboratory and numerical study of waves in the port area // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. № 6. P. 49–59.
20. Kantardgi I.G., Zheleznyak M.I., Anshakov A.S. Numerical modeling of nonlinear hydrodynamics of the coastal areas // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. № 87(3).
21. Lin L., Demirbilek Z., Mase H. et al. CMS-Wave: A nearshore spectral wave processes model for coastal in-lets and navigation projects. Coastal and Hydraulics Laboratory, Technical Rep. No. ERDC/CHL TR-08-13. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. 2008.
22. Ris R.C., Holthuijsen L.H., Booij N. A third-generation wave model for coastal regions, Part 2. Verification // *Journal of Geophysical Research*, 1999. № 104 (C4). P. 7667–7681.
23. Sánchez A, Beck T, Lin L. et al. Coastal Modeling System Draft User Manual. Vicksburg, Mississippi: US Army Corps of Engineers, Engineers Research and Development Center. 2012.
24. van Rijn L.C. Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-load Transport // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007. № 133(6). P. 649–667.
25. van Rijn L.C. Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007. № 133(6). P. 668–689.

Forecast of the Dynamics of a Sandy Beach in Complexed Hydrodynamic Conditions

I. G. Kantarzhii[#]

National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

[#]*e-mail: kantardgi@yandex.ru*

Changes in the coastal zone under the influence of currents of different nature and wind waves are being investigated. A sandy beach located in the water area of the “Park of the 300th Anniversary of St. Petersburg”, the Neva Bay of the Gulf of Finland of the Baltic Sea, is considered as an object. The beach is actively affected by wind waves and eventually washes away with the intensity of the retreat of the shore of about 4 m per year. For numerical modeling, a set of models is used: SWAN—wind-wave model and COASTOX-UN—a two-dimensional model of currents, sediment transport and bottom reformation. It was developed a model of the Neva Bay and the mouth of the Neva River from the Flood Prevention Facility Complex in the west to the river Neva near the Liteiny Bridge in the east. Based on the reanalysis of wind data, 36 strong storms were selected for a five-year period from 2014 to 2018, for the sequence of which numerical modeling of waves, currents and lithodynamic processes was carried out. It was obtained balances of alluvial and washouts after a ten-years simulated period for beach sectors. To verify the results, satellite images of the modeling area are used, it was found that the model adequately describes the main observed trends in the development of the beach.

Keywords: lithodynamic processes, beach dynamics, waves, currents, numerical modeling, satellite images