

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТОДИНАМИЧЕСКИХ И СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ

О. А. Вербицкая¹, Б. В. Архипов^{1,3}, С. В. Горбачев², О. В. Тихонова^{1,4},
А. М. Котилевская¹, А. А. Райков¹

¹ ООО «Арктический научный центр» (Москва, Российская Федерация)

² ООО «РН-Шельф-Арктика» (Москва, Российская Федерация)

³ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН (Москва, Российская Федерация)

⁴ МИРЭА — Российский технологический университет (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2025 г.

Для цитирования

Вербицкая О. А., Архипов Б. В., Горбачев С. В. и др. Моделирование литодинамических и седиментационных процессов в Печорском море // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 18—29. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-18-29.

Представлены результаты моделирования пространственного распределения переноса наносов и деформации дна в Печорском море, выполненного на основе гидроморфодинамической модели Delft3D-FLOW с модулями расчета волн (SWAN) и гидродинамических течений (FLOW), который включает блок переноса наносов. Расчеты проведены для двух периодов продолжительностью по два года. Получены данные о направлении мгновенных и усредненных потоков наносов, а также оценен результирующий объем переносимых осадков. Показано, что значимые величины вертикальных деформаций дна наблюдаются в районе от мыса Святой Нос до острова Вайгач на глубинах до 30–50 м, и направление потоков меняется в зависимости от направления ветра. Результаты моделирования сравниваются с имеющимися эмпирическими данными о потоках наносов.

Ключевые слова: моделирование литодинамических и седиментационных процессов, гранулометрический анализ, влекомые и взвешенные наносы, аккумуляция, эрозия, метеорологические характеристики, ветровые волны, морские течения, Печорское море.

Введение

Печорское море обладает высоким нефтегазоносным потенциалом, на его территории открыто несколько месторождений, выявлено более 10 структур, которые обладают большими ресурсами углеводородов. Из-за активного освоения (работ, проводимых на шельфе, включая строительство объектов) акватория моря и береговая линия подвергаются активному антропогенному воздействию. Для минимизации негативных воздействий на геосистемы как шельфа, так и береговых районов при проектировании и строительстве объектов

в прибрежной зоне морей необходимо учитывать интенсивность и направленность литодинамических процессов. В ходе литодинамических исследований проводят изучение потоков наносов, оценку динамики связных и несвязных осадков, выделение участков размыва дна и аккумуляции наносов, определяют величину и направленность изменений (деформации) рельефа берегов и дна. Традиционно проводимые натурные наблюдения и применяемый для расчетов волно-энергетический метод охватывают главным образом береговую зону и не дают понимания процессов, происходящих на всей акватории моря.

Так, для оценки вдольберегового переноса наносов часто используется волно-энергетический ме-

тод Попова — Совершаева [11; 8; 5; 9]. Аналогичные методы применяются в зарубежных исследованиях [2; 14]. Согласно этому подходу, объем вдольберегового переноса наносов пропорционален потоку энергии волн и рассчитывается с использованием простых алгебраических выражений с малым количеством входной информации.

Создание математических моделей осложнено необходимостью учитывать большое количество процессов, происходящих в атмосфере, в толще воды и на дне. Поэтому это направление исследований пока развито довольно слабо.

Одной из первых работ по гидродинамическому моделированию литодинамических процессов Печорского моря явилась статья И. П. Трубкина и И. А. Немировской [17]. Расчет проводился на период в несколько суток, которые принимались за продолжительность шторма. Ветер в таком шторме конструировался на основе таблицы повторяемости, т. е. задавались постоянные скорость и направление ветра, меняющиеся через интервалы времени, характерные для заданной скорости. Результатами являются поля вертикальных деформаций дна (размыв или накопление осадков), полученные на конец нескольких суток расчета для двух конкретных вариантов ветрового сценария (развития шторма).

В настоящей статье представлена морфогидродинамическая модель для расчета транспорта наносов и возникающих вертикальных деформаций дна в Печорском море. Результаты получены в результате математического моделирования за два расчетных периода продолжительностью по два года. В ходе расчетов использовались ежечасные поля ветра и атмосферного давления, на каждом шаге расчета учитывалось переформирование дна расчетной области. В работе представлены поля вертикальных деформаций дна (накопление/размыв), оценен объем переноса донных осадков за расчетный период (два года непрерывного модельного времени), а также показаны зависящие от направления ветра мгновенные и осредненные потоки наносов в расчетной области. Полученные результаты сравниваются с эмпирическими данными, что показывает прогресс в развитии модельных расчетов и исследованиях литодинамических процессов на шельфе Печорского моря.

Представленные в данной работе результаты важны для понимания процессов, происходящих в Печорском море, так как дают возможность определить направление и оценить объемы переносимого материала, изучить характер протекающих изменений, выявить их связь с различными факторами гидрометеорологических условий, выявить зоны с различной направленностью (размыв или накопление осадков) и уточнить величину вертикальных деформаций дна. Результаты этих исследований будут использованы в дальнейшем при проектировании и обеспечения безопасной эксплуатации сооружений на шельфе Печорского моря.

Морфолитодинамика Печорского моря

Морфодинамическая характеристика Печорского моря приведена в [6; 1; 8, 10 и др.]. Направления потоков наносов в [8] получены на основе анализа как геоморфологических признаков, так и волновых энергетических характеристик, рассчитанных по методике Попова — Совершаева [7; 11; 19]. Схема динамики вдольбереговой зоны Печорского моря, составленная авторами по данным [8], приведена на рис. 1.

Исходя из геолого-геоморфологического строения, гидродинамических процессов и как следствие особенностей литодинамики, береговую зону Печорского моря условно можно разделить на три района — Тиманский, Печорский и Варандейский (см. рис. 1).

Тиманский береговой район простирается от мыса Святой Нос до полуострова Русский Заворот. Мыс Святой Нос соединяет берег и останец коренных пород и представляет собой аккумулятивную форму двойного питания типа переймы, образующуюся за счет встречных потоков наносов со стороны Индигской и Горностаьей губ. Остров Сенгейский, имеющий высоты до 50 м и коренные породы в основании, является останцом средне-позднеплейстоценовой денудационной равнины. Здесь наличие значительных запасов песчаного материала связано с разгрузкой потоков донных наносов в зоне конвергенции. Голоценовый бар с высотами до 5—10 м к северо-востоку от острова Сенгейский в современных условиях подвержен размыву. Здесь берег термоабразионный со скоростью отступления не менее 1 м/год. Генеральное направление потока наносов в этом районе северо-восточное (см. рис. 1).

Печорский береговой район включает аккумулятивные формы (полуостров Русский Заворот и острова Гуляевские Кошки), являющиеся голоценовыми барами, которые ранее, вероятно, представляли собой единую аккумулятивную форму. Полуостров Русский Заворот сложен хорошо сортированным песчаным материалом. Вдольбереговой поток волновой энергии направлен на восток, и обуславливает движение наносов в том же направлении.

В пределах Печорской губы отмечается чередование низких термоабразионных и термоденудационных береговых откосов с аккумулятивными участками. В соответствии с данными [15] средняя скорость отступления термоабразионного берега в юго-восточной части губы (район поселка Вангурей) составляет 1,2 м/год, в бухтах — 0,4 м/год и менее. Количество осадочного материала, поступающего в береговую зону за счет термоабразии, в несколько раз меньше твердого стока реки Печора.

Варандейский береговой район охватывает участок от острова Песяков на западе до полуострова Медынский Заворот на востоке. Острова Песяков и Варандей — береговые голоценовые бары, сложенные песчаным материалом и по строению схожие с полуостровом Русский Заворот [16]. Цен-

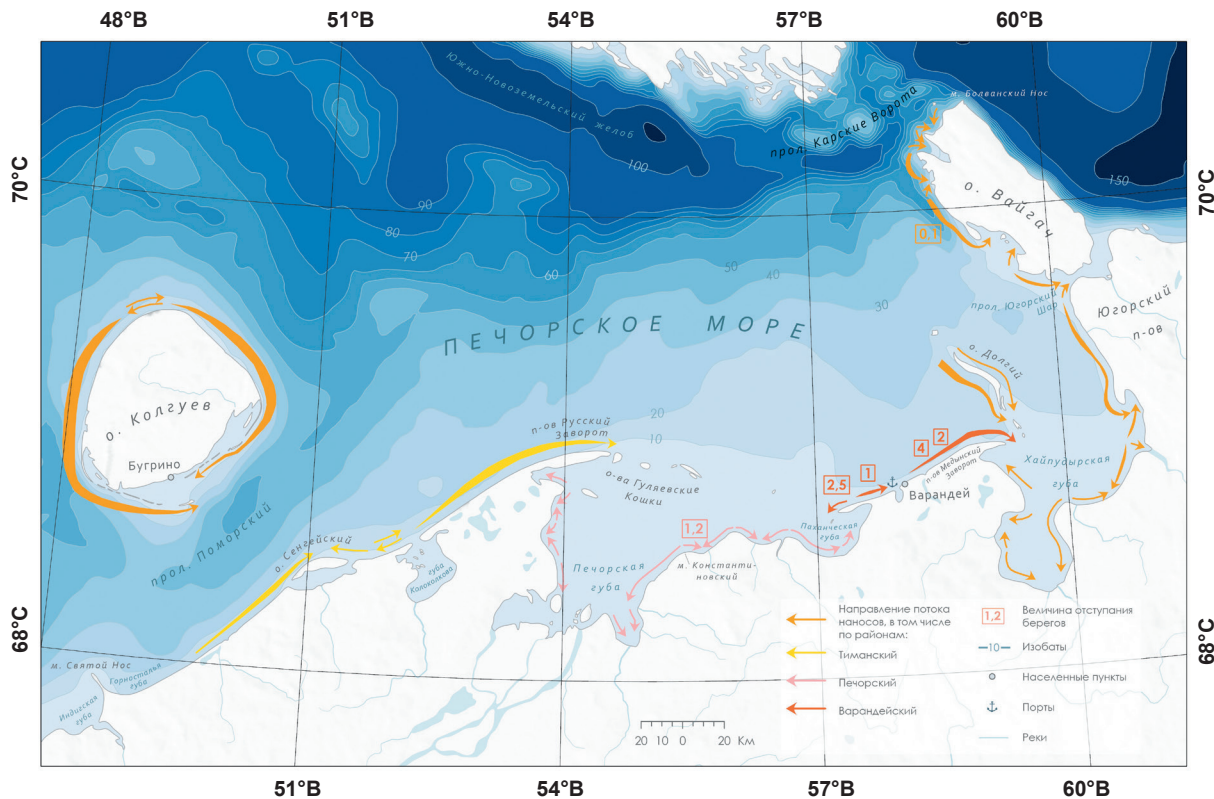


Рис. 1. Схема динамики береговой зоны Печорского моря с выделением вдольбереговых районов с использованием данных [8]
Fig. 1 Schematic map of the Pechora near shore dynamics with the identification of along-coastal areas using data from [8]

тральная часть баров на современном этапе подвержена размыву (см. рис. 1), но на их дистальных оконечностях берег аккумулятивный. Полуостров Медынский Заворот является промежуточным вариантом между косой и баром. Под его защитой получили развитие ветровые осушки и лайды. Район характеризуется ослабленными и разнонаправленными вдольбереговыми потоками волновой энергии с зоной двухсторонней миграции наносов в центральной части. Значения вдольберегового потока волновой энергии усиливаются лишь в районе полуострова Медынский Заворот, обеспечивая его размыв в прикорневой части и нарастание в дистальной (см. рис. 1). По данным Лаборатории геоэкологии Севера МГУ им. М. В. Ломоносова, которая ведет здесь наблюдения с 1987 г., на участках баров, относительно слабо затронутых деятельностью человека, береговой уступ размывался со скоростью 1—2,5 м/год, в пределах термоабразийного участка (к северо-востоку от Варандея) — 1,8—2,0 м/год [20]. На отдельных участках Варандейского побережья в результате значительного антропогенного воздействия скорость абразии берегов увеличилась до 3—4 м/год [8].

Материалы и методы

Построение полной математической модели литодинамических процессов осложнено рядом факторов, среди которых отметим следующие:

- высокая временная изменчивость ряда природных факторов, оказывающих влияние на литодинамические процессы;
- необходимость одновременного учета как постоянно действующего прилива, так и штормовых воздействий с учетом характеристик их повторяемости;
- сложность создания карты донных осадков из-за их высокой пространственной неоднородности;
- сложность описания границы «суша — море» и рельефа дна при моделировании из-за высокой изрезанности и неоднородности строения соответственно;
- ограничение моделей в части задания граничных условий на открытой и твердой границах, вертикальной стратификации наносов.

В настоящем исследовании для моделирования изменения морфолитодинамических условий был использован программный комплекс гидродинамического моделирования Delft3D [3; 13]. Он использует два основных расчетных модуля. Волновой модуль включает в себя модель SWAN (Simulating Waves Nearshore) для вычисления генерации и распространения волн. Гидродинамические условия моделируются с помощью модуля Delft3D-FLOW, который решает нестационарные уравнения гидродинамики с включением блока переноса наносов. В Delft3D-FLOW поток наносов возникает, когда донное трение и/или скорость трения превышают

некоторые критические значения, определяемые исходя из характеристик дна и переносимого материала.

При рассмотрении переноса наносов в Delft3D-FLOW осадки разделяются на два типа: несвязные (песок средний и мелкий) и связные (ил — пелиты, алевроиты). Перенос несвязных осадков осуществляется в виде влекомых и взвешенных наносов, а перенос связных осадков рассматривается только в виде взвешенных наносов. Для разделения механизмов перемещения наносов определяется контрольная концентрация c_a и контрольная высота a , ниже которой осуществляется механизм влекомых наносов, выше — взвешенных [12].

Моделирование переноса влекомых наносов течениями и волнами осуществляется по формулам Ван Рейна в виде двумерных алгебраических выражений. Перенос взвешенных наносов в отличие от ряда других работ [5] в Delft3D-FLOW моделируется путем решения трехмерного уравнения адвекции-диффузии (баланса массы) с учетом концентрации взвешенных веществ каждой фракции. Важен учет обмена взвешенными наносами между дном и потоком, в результате чего возникает либо осаждение взвешенных веществ под действием силы тяжести (сток), либо взмучивание их со дна в воду (источник). Выражения для источника и стока имеют размерность кг/с/м^2 и существенно различаются для связных и несвязных осадков, особенно скоростью осаждения частиц. Кроме того, если происходит обмен с дном, то результирующее изменение батиметрии должно влиять на последующие гидродинамические расчеты, а взаимодействие фракций осадка имеет значение для расчета локальной скорости затрудненного осаждения каждой фракции взвешенных веществ. Также учитывается влияние взвешенных веществ на локальную плотность смеси и, следовательно, на затухание турбулентности.

Входные данные

Для расчета гидродинамических и волновых характеристик использовались поля атмосферного давления на уровне моря и компоненты скорости приводного ветра из реанализа ERA5¹. Данные до-

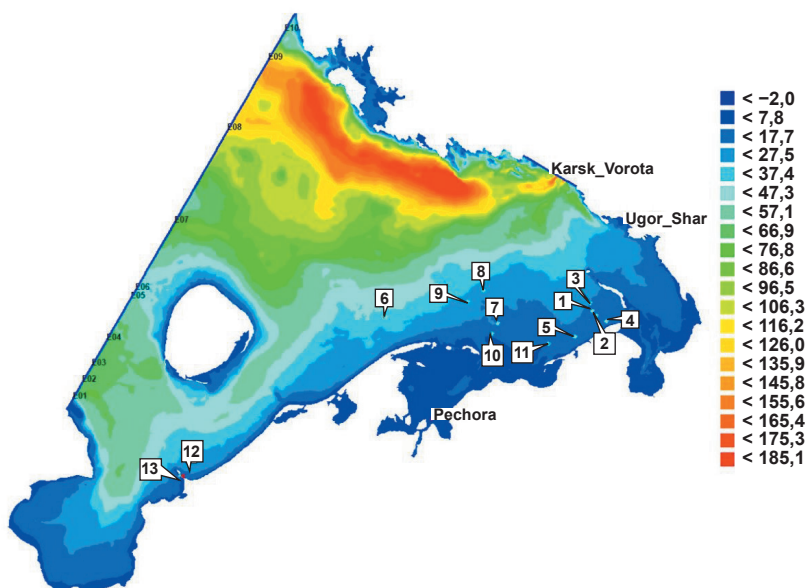


Рис. 2. Глубины (м, показаны цветом) в пределах области моделирования с указанием открытых границ и расположением расчетных точек (нумерация в соответствии с табл. 1)

Fig. 2. The modeling area with the depths (m, shown in color), open boundaries and calculation points (numbering according to Tab. 1)

ступны на сетке с шагом $0,25^\circ$, дискретность по времени составляет 1 ч.

На трех открытых границах, а именно в проливах Карские Ворота и Югорский Шар и между полуостровами Канин и Гусиная Земля (архипелаг Новая Земля) задаются прилив и колебания уровня моря по закону обратного барометра. Область моделирования, глубины в ее пределах, открытые границы и расположение расчетных точек приведены на рис. 2. Соответствия номеров точек на карте и названий приведены в табл. 1.

Типы грунтов, выявленные в Печорском море, получены по опубликованным данным [21; 18; 4]. Характеристики физических свойств грунтов и их пространственное распределение уточнены по результатам инженерно-геологических изысканий. В процессе обработки использовались данные лабораторных исследований гранулометрического состава образцов грунта, отобранного из инженерно-геологических скважин и станций пробобора в интервале глубин 0,0—1,0 м. Эти данные были использованы для создания модели грунтов.

По типу грунтов в Печорском море можно выделить несколько районов (рис. 3):

- вдоль берега от мыса Святой Нос до полуострова Русский Заворот и далее полосой шириной 50—55 км примерно до широты Варандея (58° с. ш.) — средние и мелкие пески;
- к югу и востоку острова Колгуев — пелито-алевритовые грунты;
- к западу от острова Вайгач и к юго-западу от Новой Земли — область пелито-алевритовых грунтов.

¹ ERA5 Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.

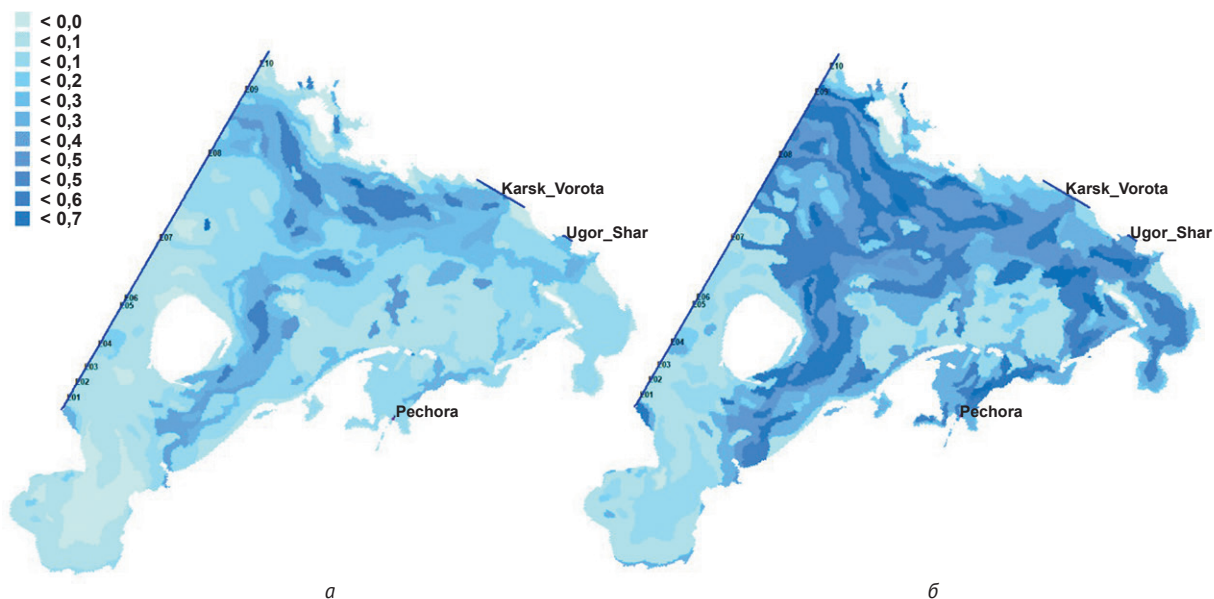


Рис. 3. Толщина слоя для пелитовой (а) и алевроитовой (б) фракции в модели, м
Fig. 3. The mapped depths of pelit (a) and aleurit (b) layers, used in the model, m

При моделировании в каждой расчетной точке задаются начальная толщина слоя для каждой фракции и ее процентное содержание в донном грунте. Таким образом, толщина слоя преобладающей фракции больше, чем у фракций с более низким процентом, что влияет на переход наносов данной фракции во взвешенное состояние.

В соответствии с моделью грунтов, используемой в данном исследовании, выделяются четыре основных типа грунта: средний песок ($d \approx 0,3$ мм), мелкий песок ($d \approx 0,15$ мм), алевроит ($d \approx 0,06$ мм), пелит ($d \approx 0,01$ мм), процентное распределение которых зависит только от их местоположения. Примеры карт пространственного распространения пелитовой и алевроитовой фракций, используемые в модели, приведены на рис. 3. Пелитовые фракции расположены в основном в Южно-Новоземельском желобе (см. рис. 1) и восточнее острова Колгуев (см. рис. 3а), а в ряде других мест их содержание мало. Алевроитовые фракции шире распространены, и толщина слоя алевроитов больше (см. рис. 3б).

Результаты расчетов

Численное моделирование циркуляции водных масс под действием метеорологических воздействий и приливных явлений, волновых и литодинамических процессов проведено на акватории всего Печорского моря с сеткой шагом в 1 морскую милю (327×263 уз). Прибрежные ячейки были адаптированы для корректного воспроизведения береговой линии.

Расчеты проведены для двух периодов по два года — 01.01.2013—31.12.2014 и 01.01.2021—31.12.2022. В качестве входных данных задавались поля ветра и атмосферного давления с дискретно-

стью 1 ч. Таким образом, расчеты отражают литодинамический режим при разных ветровых условиях.

Мгновенные (за определенную дату) и осредненные (за весь период расчетов) карты подтверждают зависимость направления и интенсивности переноса наносов от скорости и направления ветра. Полученные результаты в целом согласуются с имеющимся представлением о направлении вдольбереговых потоков (см. рис. 1), но выявлены некоторые отличия.

Поля ветра и соответствующие им рассчитанные мгновенные потоки наносов для двух разных дат показаны на рис. 4. В первом примере юго-западный ветер со средней скоростью 8—10 м/с (рис. 4а) формирует северо-восточное направление потока наносов вдоль Тиманского берега (рис. 4б) с интенсивностью $2,3 \cdot 10^{-7}$ — $4,7 \cdot 10^{-6}$ м³/с/м. Размерность м³/с/м обозначает объем переносимого материала в м³ за 1 с через 1 пог. м. При смене направления ветра на северо-северо-западное и ослаблении воздушного потока до 2—5 м/с (рис. 4в) поток наносов ослабевает до $4,7 \cdot 10^{-8}$ — $9,5 \cdot 10^{-7}$ м³/с/м и меняет направление на юго-западное (рис. 4г).

Зависимость от направления ветра проявляется и в осредненных полях, полученных для двух периодов расчета (рис. 5). В 2021—2022 гг. результирующий поток наносов направлен вдоль Тиманского и Варандейского берегов на северо-восток. В 2013—2014 гг. результирующий поток имеет юго-западное направление как вдоль Варандейского, так и вдоль Тиманского побережий, и только на подходах к мысу Святой Нос направление меняется, что объясняется более сложной динамикой в этом районе. Такое направление отличается от классической схемы перемещения наносов, описанной в [8].

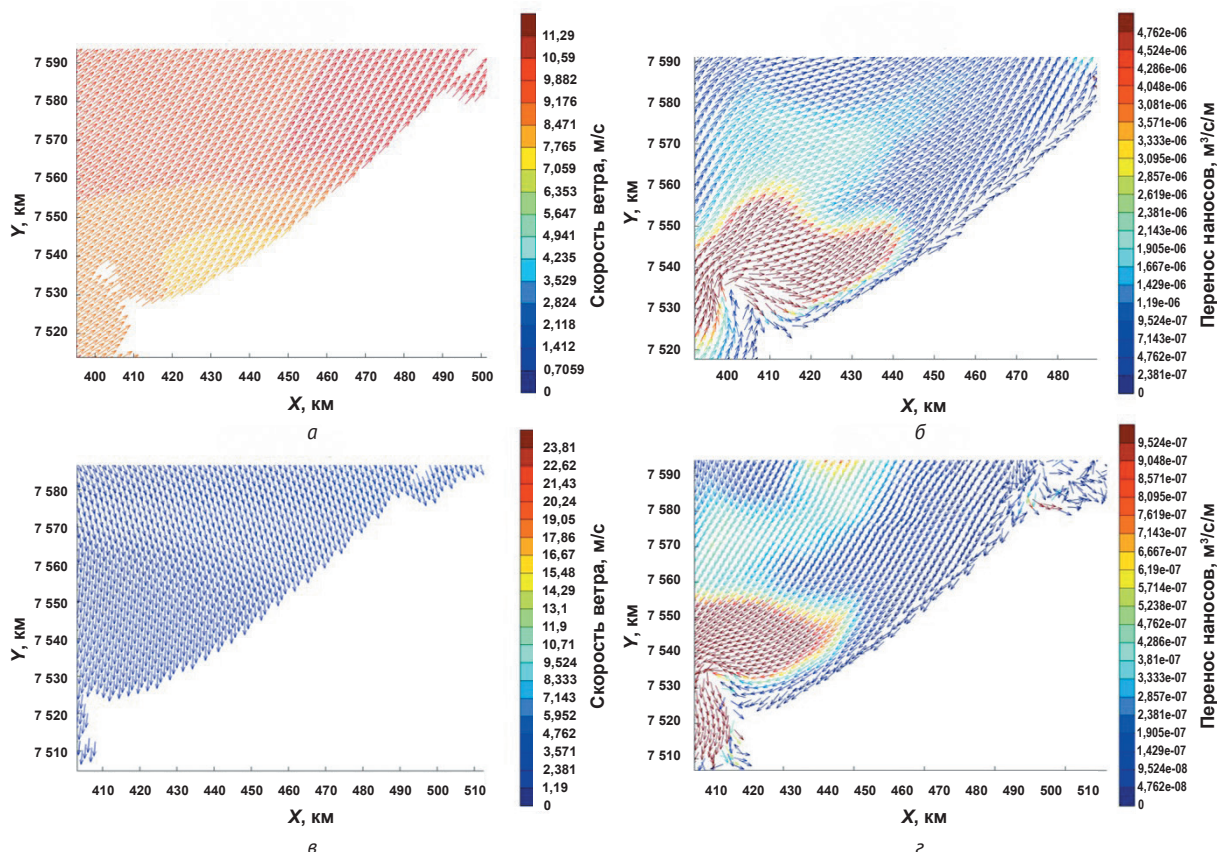


Рис. 4. Соответствие полей ветра (а, в) и потока наносов (б, г) на участке Тиманского берега от мыса Святой Нос до острова Сенгейский для двух случаев (а, б) и (в, г)

Fig. 4. The correspondence of wind (a, в) and sediments flow (б, г) at the Timan coast area between Svyatoi Nos and Senegaysky island for two cases (a, б) and (в, г)

Интенсивность потока наносов вдоль Тиманского берега составляет в расчетах 2013—2014 гг. $0\text{--}2,2 \cdot 10^{-5}$ м³/с/м, в 2021—2022 гг. — чуть слабее: $0\text{--}2,0 \cdot 10^{-5}$ м³/с/м. Вдоль Варандейского берега поток наносов более интенсивный, и в двух вариантах расчета его величина составляет $0\text{--}4,0 \cdot 10^{-5}$ м³/с/м (рис. 5).

Итоговая величина накопления/размыва за расчетные периоды представлена на рис. 6. В целом для обоих вариантов расчетов результаты похожи как по направлению перемещения донных осадков, так и по величине, что говорит о выравнивании/подстройке рельефа в регионе под гидродинамические условия.

Анализ результатов, представленных на рис. 6, показывает, что Печорское море с точки зрения величины дефор-

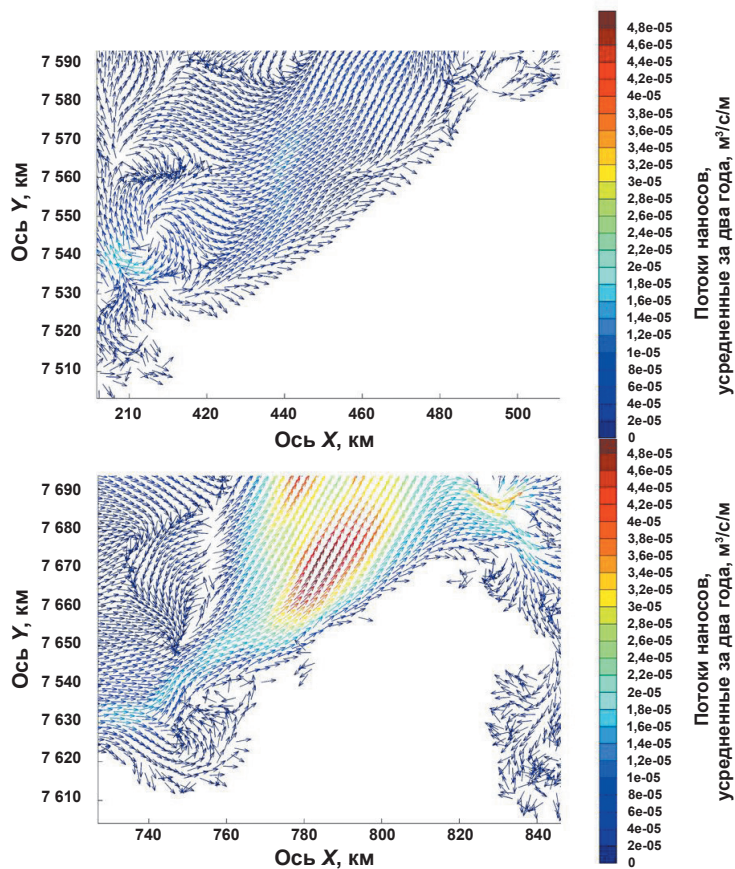


Рис. 5. Потоки наносов у Тиманского (сверху) и Варандейского (внизу) берегов, осредненные за период расчетов 2021—2022 гг.

Fig. 5. Sediments flows at the Timan (top) and Varandey (bottom) coast areas, resulting from the 2021—2022 calculations

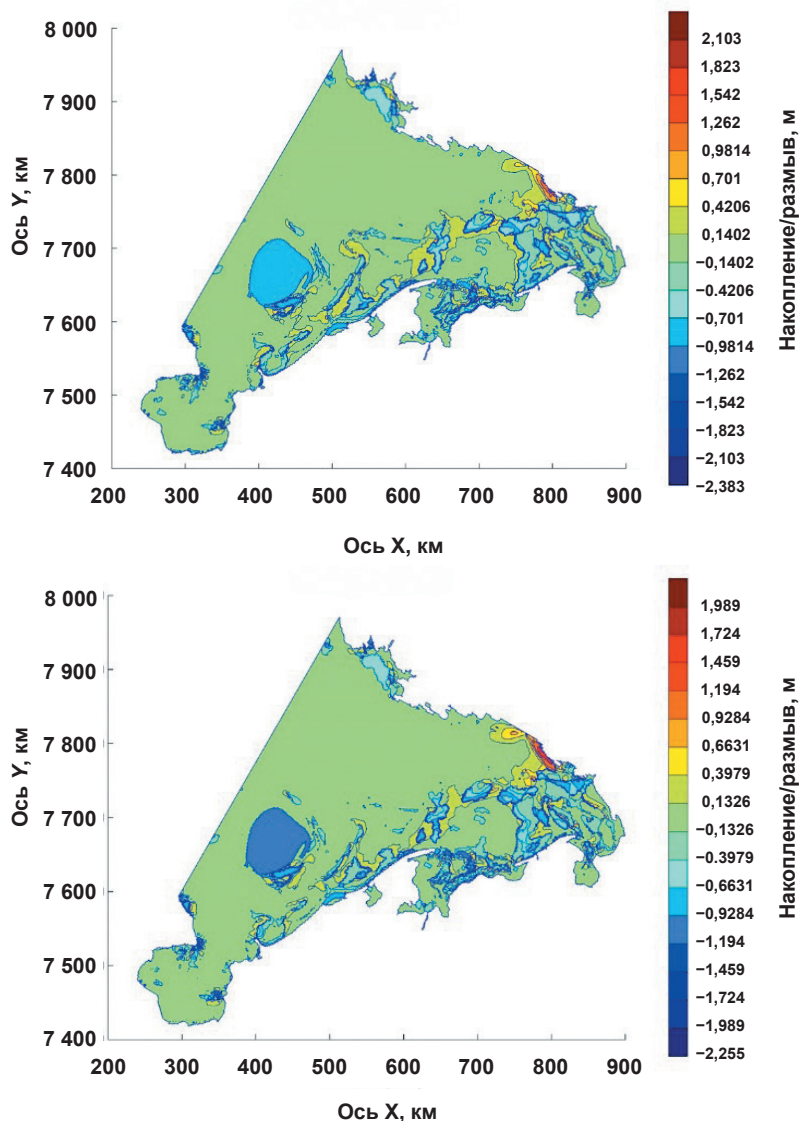


Рис. 6. Вертикальные деформации дна (м/2 года) в Печорском море по результатам расчетов за 2013–2014 гг. (сверху) и за 2021–2022 гг. (снизу)
Fig. 6. Vertical bottom deformations (m/2 years) according to the results of calculations for 2013–2014 (top) and for 2021–2022 (bottom)

маций дна можно условно разделить на две части. В глубоководной части к юго-западу от архипелага Новая Земля (глубины более 30 м) потоки наносов близки к нулю, изменения рельефа дна практически отсутствуют. Вдольбереговой район (с преобладающими глубинами 0–30 м) включает почти все мелководье от мыса Святой Нос до пролива Карские Ворота, а также южную прибрежную часть острова Колгуев, и характеризуется активными литодинамическими процессами, особенно в восточной части моря. Результирующие изменения рельефа: накопление — 0,8 м, размыв — 1 м.

На рис. 7 показаны результаты расчетов изменения интенсивности накопления/размыва дна за двухгодичные периоды для трех точек 2N1, 2N2, 2N4 4 (см. табл. 1 и рис. 2).

Сравнение графиков деформаций дна для разных периодов расчетов отражает изменчивость потоков наносов и их зависимость от ветрового режима. Период 2013–2014 гг. (синие кривые на графиках) характеризуется более интенсивными изменениями вследствие более сильных штормов, что проявляется в виде резких скачков накопления/размыва, а для 2021–2022 гг. графики (красные кривые) более сглажены. В точках 2N1 и 2N2 происходит накопление примерно до 0,14 см, а в точке 2N4 — размыв до 0,7 м (рис. 8). Такое существенное отличие, несмотря на близкое расположение точек, можно объяснить тем, что точка 2N4 попадает в область дивергенции потоков наносов и их усиления (рис. 7) из-за обтекания острова Долгий с севера, что приводит к интенсивному размыву. Точки 2N1 и 2N2 располагаются в области конвергенции, которая связана с торможением потока при его набегаании на остров Долгий и как следствие с накоплением осадков.

Характер транспорта наносов вокруг мыса Святой Нос по результатам моделирования согласуется с данными наблюдений [8]. Результаты расчета в точках, расположенных по обе стороны от мыса Святой Нос, демонстрируют аккумуляцию донных осадков как с юго-западной, так и с северо-восточной сторон переимы, что приводит к ее дальнейшему формированию.

В табл. 1 приведены результирующие вертикальные деформации дна по результатам расчетов для двух периодов в нескольких точках (их расположение показано на рис. 2), а также величина максимального изменения рельефа дна за один шторм. Максимальная итоговая величина накопления материала за два периода расчетов достигается в точке М1 (глубина 14 м) и составляет 25 и 32 см, а размыв в точке 2N4 (глубина около 27 м) — 78 см. Максимальная деформация за один шторм в рассматриваемых точках не превышает 5 см за исключением точек 2N4 и BM1N3, где она достигает 10 см.

По результатам повторных обследований дна в районе расположения точек 2N2, 2N4, Па1, СГ1 значительных деформаций дна не выявлено, что со-

гласуется с результатами расчетов, приведенных в табл. 1.

Концентрация взвешенного вещества для спокойных и штормовых условий показана для точки 2N4 для разных фракций: пелита, алеврита (рис. 8а и 8б), мелкого и среднего песков (рис. 8в и 8г). Для штилевых условий концентрации связных осадков близки к нулю, а в штормовых (резкие изменения на графиках) могут достигать значений $0,07 \text{ кг/м}^3$ для пелита и $0,4 \text{ кг/м}^3$ для алеврита. Отметим, что завышенные концентрации для алевритовых фракций по сравнению с пелитовыми в модели связано с большей толщиной осадков алевритовых фракций (см. рис. 3). Выбросы концентрации для несвязных осадков приурочены к сильным штормам, и чем больше размер частиц, тем реже всплески и тем меньше концентрация (рис. 8в и 8г).

Выводы

В работе проведено моделирование геоморфологических процессов в Печорском море в масштабе всего моря, обсуждены результаты, показан прогресс по сравнению с результатами предыдущих работ, даны количественные и качественные оценки величин потоков наносов, уточнены районы размыва/накопления донных осадков.

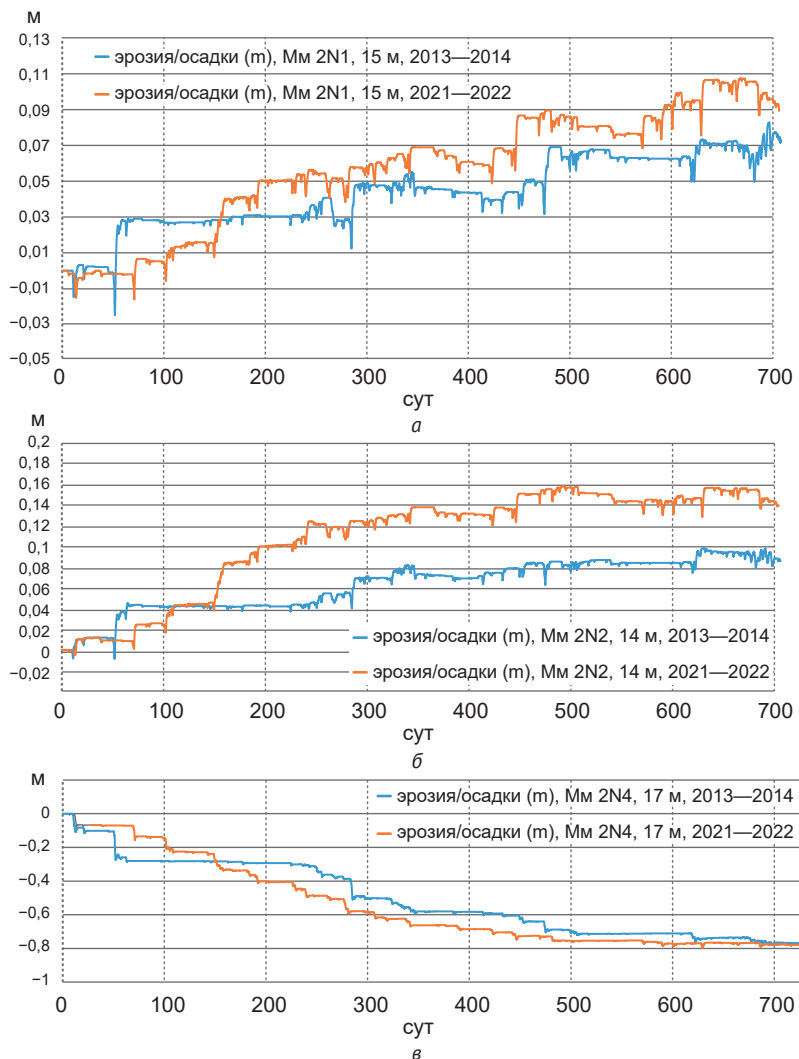


Рис. 7. Накопление/размыв (м) осадков для точек 2N1 (а), 2N2 (б), 2N4 (в) за расчетные периоды – 2013–2014 гг. (синяя кривая) и 2021–2022 гг. (красная кривая)

Fig. 7. Accumulation/erosion (m) of sediments for points 2N1 (a), 2N2 (б), 2N4 (в) for the estimated periods 2013–2014 (blue curve) and 2021–2022 (red curve)

Таблица 1. Сравнение результирующих значений деформаций дна и величины штормовых деформаций (размыв/накопление) в точках Печорского моря по результатам расчетов за 2013–2014 и 2021–2022 гг.

Table 1. Resultant bottom deformations and storm bottom deformations (accumulation and erosion) for calculation points at the Pechora sea for the 2013–2014 and 2021–2022 calculations

Номер точки на рис. 2	Точка	Глубина моря, м	Результирующие значения деформаций дна, м		Максимальные деформации дна за один шторм, м	
			2013–2014	2021–2022	2013–2014	2021–2022
1	2N1	21,1	0,08	0,10	0,04	0,04
2	2N2	12,9	0,10	0,16	0,02	0,05
3	2N4	26,5–27,0	–0,78	–0,78	0,10	0,10
4	1N3	16,8–17,9	–0,05	–0,06	0,03	0,01
5	BM1N1	17,5–16,5	–0,70	–0,65	0,10	0,05
6	Пом1	15,0	–0,15	–0,17	0,05	0,03

Номер точки на рис. 2	Точка	Глубина моря, м	Результирующие значения деформаций дна, м		Максимальные деформации дна за один шторм, м	
			2013—2014	2021—2022	2013—2014	2021—2022
7	Па1	16,0—17,0	0,14	0,13	0,05	0,02
8	СГ1	15,5—16,5	0,08	0,05	0,02	0,01
9	СГ2Р	17,0	0,08	0,07	0,03	0,01
10	Па2	16,6	0,13	0,10	0,03	0,01
11	М1	14,0	0,25	0,32	0,08	0,05
12	СНЕ	10,0	0,16	0,15	0,05	0,05
13	СНВ	5,0	0,20	0,1	0,02	0,01

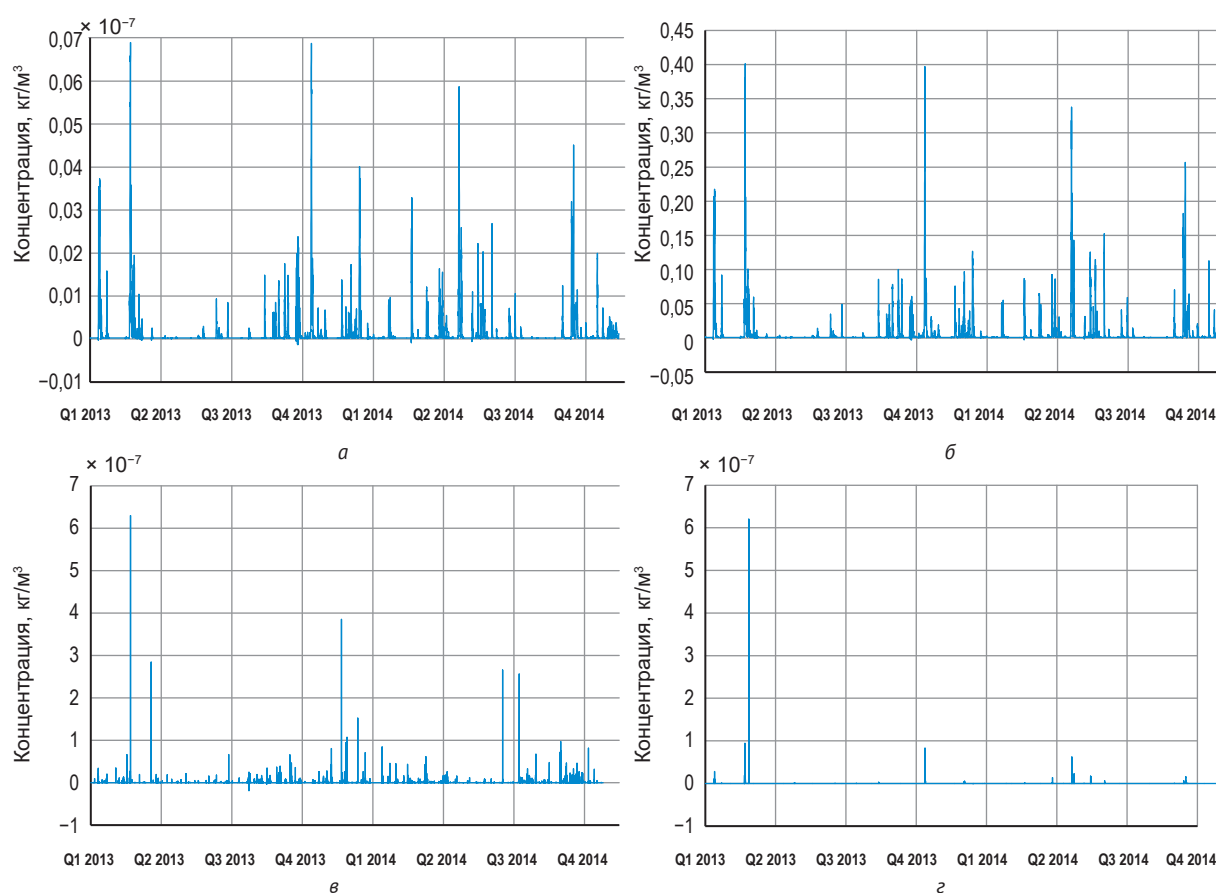


Рис. 8. Придонная концентрация взвешенного вещества ($\text{кг}/\text{м}^3$) в точке 2N4: пелит (а), алеврит (б), песок мелкий (в), песок средний (г) (Q1, Q2, Q3, Q4 – начала кварталов для периода 2013–2014 гг.)
Fig. 8. Suspended solids bottom concentration (kg/m^3) for the point 2N4: pelit (a), alevrit (б), fine sand (в), mid-sized sand (г) (Q1, Q2, Q3, Q4 – 2013–2014 quarters)

Для Печорского моря данные расчеты выполнены впервые.

Результаты моделирования во многом согласуются с опубликованными эмпирическими данными и, таким образом, подтверждают правильность

выбранного подхода и доверие к полученным результатам.

Данные расчетов показали необходимость выделения глубоководного и прибрежного районов с точки зрения интенсивности литодинамических

процессов. На большей части Печорского моря интенсивность литодинамических процессов можно оценить как низкую или среднюю, т. е. деформации дна за год не превышают 0,2 м/год (см. рис. 6). Однако в отдельных районах в прибрежной зоне с глубинами до 15—30 м интенсивность процессов высокая — возможны изменения рельефа дна до 1 м/год.

Расчеты на доработанной сетке, адаптированной к сложной береговой линии и с учетом накопленных изменений рельефа, позволили исследовать особенности потоков наносов в отдельных районах моря. Например, в районе мыса Святой Нос рассчитанные западные и восточные потоки отражают процесс постепенной заносимости/нарастания перемы.

В то же время расчеты показали, что направление и величина вдольбереговых потоков наносов могут изменяться в зависимости от направления ветра: ветра южных румбов формируют движение потока наносов на северо-восток, ветра северных румбов — на юго-запад, в соответствии с ориентированием береговой линии. Осредненные потоки для 2013—2014 гг. на участке Тиманского берега направлены на юго-запад, в то время как в расчете для 2021—2022 гг. в основном направлены на северо-восток.

Схожесть результирующих карт накопления/размыва для двух расчетов говорит о пространственном постоянстве зон накопления/размыва на акватории моря.

Дальнейшее изучение транспорта наносов в Печорском море видится в усовершенствовании модели транспорта наносов и проведении исследований по влиянию на результаты расчетов более тонкой сетки (особенно в прибрежных районах), учета имеющихся сооружений на шельфе, продолжительности периода расчетов и расширения области моделирования в Карское море (для минимизации влияния амфидромической точки в районе пролива Карские Ворота). Более детальная модель грунтов, использование подстроенной под динамический режим батиметрии и тщательный учет вклада различных грунтовых фракций могут привести к улучшению понимания происходящих донных переносов. Кроме того, организация и проведение регулярных наблюдений за деформациями дна на отдельных участках моря могут обеспечить фактическими данными, необходимыми для верификации полученных результатов.

Литература/References

1. Атлас абразионной и ледово-экзарационной опасности прибрежно-шельфовой зоны Российской Арктики / Науч.-исслед. лаборатория геоэкологии Севера геогр. факультета МГУ им. М. В. Ломоносова при поддержке Рос. науч. фонда, проект 16-17-00034 (продление). — М., 2020. — 69 с.
Atlas of abrasion and ice-extraction hazards of the coastal shelf zone of the Russian Arctic. Scientific Re-

search Laboratory of Geoecology of the North, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, with the support of the Russian Science Foundation, project 16-17-00034 (extension). Moscow, 2020, 69 p. (In Russian).

2. CERC. Shore Protection Manual. Coastal Engineering Research Center, Waterways Experiment Station, U.S. Arm., 1984.

3. Delft3D-FLOW User Manual. Version: 3.15. Revision: 18392 (7 September 2011). Delft, Deltares, 2011. Delft3D-WAVE User Manual. Version: 3.04. Revision: 15779 (18 May 2011). Delft, Deltares, 2011.

4. Gurevich V. L. Recent sedimentogenesis and environment of the Arctic shelf of western Eurasia. Meddelelser 131. Oslo, NPI, 1995, 92 p.

5. Леонтьев И. О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. — М.: ГЕОС, 2001. — 272 с.
Leontiev I. O. Coastal dynamics: waves, currents, sediment flows. Moscow, GEOS, 2001, 272 p. (In Russian).

6. Мельников В. П., Спесивцев В. И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. — Новосибирск: Наука, 1995. — 197 с.

Melnikov V. P., Spesivtsev V. I. Engineering-geological and geocryological conditions of the shelf of the Barents and Kara Seas. Novosibirsk, Nauka, 1995, 197 p. (In Russian).

7. Морская геоморфология. Терминологический справочник. Береговая зона: процессы, понятия определения / Науч. ред. В. П. Зенкович и Б. А. Попов. — М.: Мысль, 1980. — 280 с.

Marine geomorphology. Terminology reference. The coastal zone: processes, concepts, definitions. Scientific ed. by V. P. Zenkovich, B. A. Popov. Moscow, Mysl, 1980, 280 p. (In Russian).

8. Огородов С. А. Морфология и динамика берегов Печорского моря // Труды на Института по океанология. — Т. 3. — Варна: Българска академия на науките, 2001. — С. 77—86. — (На болгар. яз.).

Ogorodov S. A. Morphology and dynamics of the Pechora sea shoreline. Proceedings of the Institute of Oceanology. Vol. 3. Varna, Bulgarian Academy of Sciences, 2001, pp. 77—86. (In Bulgarian).

9. Ogorodov S. A. Application of wind-energetic method of Popov-Sovershaev for investigation of coastal dynamics in the Arctic. Arctic Coastal Dynamic. Report of an International Workshop. Potsdam (Germany) 26—30 November 2001. Reports on Polar and Marine Research. Ed. by V. Rachold et al. Bremerhaven, 2002, vol. 413, pp. 37—42.

10. Огородов С. А. Морфолитодинамика береговой зоны Варандейского района Печорского моря в условиях техногенного прессинга // Геоэкология, инженер. геология, гидрогеология, геокриология. — 2004. — № 3. — С. 1—6.

Ogorodov S. A. Morpholithodynamics of the coastal zone of the Varandeysky district of the Pechora Sea under anthropogenic pressure. Geoecology, engineer-

- ing geology, hydrogeology, Geocryology, 2004, no. 3, pp. 1—6. (In Russian).
11. Попов Б. А., Совершаев В. А. Принципы выбора исходных данных для расчетов потоков волновой энергии // Береговая зона моря. — М.: Наука, 1981. — С. 47—52.
- Popov B. A., Sovershaev V. A. Principles of selecting initial data for calculating wave energy fluxes. Coastal zone of the sea. Moscow, Nauka, 1981, pp. 47—52. (In Russian).
12. Van Rijn L. C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. The Netherlands, Aqua Publications, 1993, 690 p.
13. Ruessink G., Roelvink J. A. Validation of On-line Mud Transport within Delft3D-FLOW. Tech. rep. WLj Delft Hydraulics. The Netherlands, Delft, 2000.
14. Shoonnes J. S., Theron A. K. Accuracy and applicability of the SPM longshore transport formula. 24-th Int. Conf. on Coastal Eng. Kobe, Japan, 1994, pp. 630—643.
15. Суздальский О. В., Куликов И. В. Ландшафтно-литодинамическая схема Печорской губы // Вопросы картирования прибрежного мелководья Баренцева и Белого морей. — СПб., 1997. — С. 72—83.
- Suzdalskiy O. V., Kulikov I. V. Landscape-lithodynamic scheme of the Pechora Bay. Issues of mapping the coastal shallow waters of the Barents and White Seas. Saint Petersburg, 1997, pp. 72—83. (In Russian).
16. Синицын А., Гуган Э., Кокин О. и др. Исследования процессов береговой эрозии на Варандее, Баренцево море: Доклад на Конференции SPE по разработке месторождений в осложненных условиях и Арктике 15—17 октября 2013 г. в Москве, Россия, МГУ / SPE 166932. О-во инженеров нефтегаз. пром-сти. — М., 2013. — 9 с.
- Sinitsyn A., Guegan E., Kokin O., Vergun A., Udalov L., Ogorodov S. A. Studies of coastal erosion processes in Varandey, Barents Sea. Report at the SPE Conference on Field Development in Difficult Conditions and the Arctic on October 15—17, 2013 in Moscow, Russia, MSU. SPE 166932 Society of Petroleum Engineers. Moscow, 2013, 9 p. (In Russian).
17. Трубкин И. П., Немировская И. А. Модельные расчеты динамики наносов в Печорском море // Геоморфология и палеогеография. — 2022. — Т. 53, № 4. — С. 17—24.
- Trubkin I. P., Nemirovskaya I. A. Model calculations of sediment dynamics in the Pechora Sea. Geomorphology and Paleogeography, 2022, vol. 53, no. 4, pp. 17—24. (In Russian).
18. Ульяновцев А. С., Чикирëв И. В., Никифоров С. Л. и др. Литологическая характеристика современных осадков Печорского моря // Вестн. МГТУ. — 2019. — Т. 22, № 1. — С. 199—206.
- Ulyantsev A. S., Chikirev I. V., Nikiforov S. L., Sorokhtin N. O., Meluzov A. A., Ananyev R. A., Dmitrevsky N. N., Libina N. V. Lithological characteristics of modern sediments of the Pechora Sea. Bull. of MSTU, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 199—206. (In Russian).
19. Попов Б. А., Совершаев В. А. Некоторые черты динамики арктических берегов Азии // Вopr. географии. Сб. 119: Морские берега. — М.: Мысль, 1982. — С. 105—116.
- Popov B. A., Sovershaev V. A. Some features of the dynamics of the Arctic shores of Asia. Issues of Geography. Collection 119: Sea Shores. Moscow, Mysl, 1982, pp. 105—116. (In Russian).
20. Новиков В. Н., Федорова Е. В. Разрушение берегов в юго-восточной части Баренцева моря // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. — 1989. — № 1. — С. 64—68.
- Novikov V. N., Fedorova E. V. Coastal destruction in the southeastern part of the Barents Sea. Bull. of the Moscow State University. Ser. 5. Geography, 1989, no. 1, pp. 64—68. (In Russian).
21. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. — СПб.: ФГУП «ВСГЕИ», 2015. — 12 с.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Saint Petersburg, VSEGEI, 2015, 12 p. (In Russian).

Информация об авторах

Вербицкая Ольга Александровна, кандидат физико-математических наук, эксперт, ООО «Арктический научный центр» (119333, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 55/1), e-mail: oa_verbitskaya@arc.rosneft.ru.

Архипов Борис Витальевич, кандидат физико-математических наук, эксперт, ООО «Арктический научный центр» (119333, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 55/1); ведущий математик, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН (119333, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2), e-mail: arh12.bor12@yandex.ru.

Горбачев Сергей Викторович, кандидат технических наук, начальник управления, ООО «РН-Шельф-Арктика» (121151, Россия, Москва, ул. Можайский Вал, д. 8Б), e-mail: svgorbachev@rnsha.rosneft.ru.

Тихонова Ольга Викторовна, ведущий специалист, ООО «Арктический научный центр» (119333, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 55/1); преподаватель, МИРЭА — Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, д. 78).

Котилевская Алина Михайловна, главный специалист, ООО «Арктический научный центр» (119333, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 55/1), e-mail: am_kotilevskaia@arc.rosneft.ru.

Райков Алексей Анатольевич, главный специалист, ООО «Арктический научный центр» (119333, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 55/1), e-mail: aa_raikov@arc.rosneft.ru.

MODELING OF LITHODYNAMIC AND SEDIMENTATION PROCESSES IN THE PECHORA SEA

Verbitskaya, O. A.¹, Arkhipov, B. V.^{1,3}, Gorbachev, S. V.²,
Tikhonova, O. V.^{1,4}, Kotilevskaya, A. M.¹, Raykov, A. A.¹

¹ Arctic Science Center LLC (Moscow, Russian Federation)

² RN-Shelf-Arctic LLC (Moscow, Russian Federation)

³ FSBI FIC IU RAS (Moscow, Russian Federation)

⁴ Russian Technological University MIREA (Moscow, Russian Federation)

The article was received on February 18, 2025

For citing

Verbitskaya O. A., Arkhipov B. V., Gorbachev S. V., Tikhonova O. V., Kotilevskaya A. M., Raykov A. A. Modeling of lithodynamic and sedimentation processes in the Pechora Sea. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 18—29. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-18-29. (In Russian).

Abstract

The results of modeling the spatial distribution of sediment transport and seabed deformation in the Pechora Sea are presented. The modeling has been performed using the Delft3D-FLOW hydromorphodynamic model, which includes modules for wave calculations (SWAN) and hydrodynamic currents (FLOW), as well as a sediment transport module. The calculations have been conducted for two periods, each lasting two years. Data on the direction of instantaneous and averaged sediment flows have been obtained, and the total volume of transported sediments has been estimated. The study shows that significant vertical seabed deformations occur in the area from Cape Svyatoy Nos to Vaigach Island at depths of up to 30—50 m, with sediment flow directions varying depending on wind direction. The modeling results are compared with existing empirical data on sediment flows.

Keywords: modeling of lithodynamic and sedimentation processes, granulometric analysis, bedload and suspended sediments, accumulation, erosion, meteorological characteristics, wind waves, ocean currents, Pechora Sea.

Information about the authors

Verbitskaya, Olga Alexandrovna, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Expert, Arctic Science Center LLC (55/1 str. 2, Leninsky Av., Moscow, Russia, 119333), e-mail: oa_verbitskaya@arc.rosneft.ru.

Arkhipov, Boris Vital'evich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Expert, Arctic Science Center LLC (55/1 str. 2, Leninsky Av., Moscow, Russia, 119333); Leading Mathematician, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences (44 str. 2, Vavilova St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: arh12.bor12@yandex.ru.

Gorbachev, Sergey Viktorovich, PhD of Sciences in Technology, RN-Shelf-Arctic LLC (8B, Mozhaisky Val St., Moscow, Russia, 121151), e-mail: svgorbachev@rnsha.rosneft.ru.

Tikhonova, Olga Viktorovna, Chief Specialist, Arctic Science Center LLC (55/1 str. 2, Leninsky Av., Moscow, Russia, 119333); Lecturer, MIREA — Russian Technological University (78, Vernadsky Av., Moscow, Russia, 119454).

Kotilevskaya, Alina Mikhailovna, Chief Specialist, Arctic Science Center LLC (55/1 str. 2, Leninsky Av., Moscow, Russia, 119333), e-mail: am_kotilevskaia@arc.rosneft.ru.

Raykov, Alexey Anatol'evich, Chief Specialist, Arctic Science Center LLC (55/1 str. 2, Leninsky Av., Moscow, Russia, 119333), e-mail: aa_raikov@arc.rosneft.ru.

© Verbitskaya O. A., Arkhipov B. V., Gorbachev S. V., Tikhonova O. V., Kotilevskaya A. M., Raykov A. A., 2025