

УДК 551.5(571.121)

Н.А. Дианский, И.М. Кабатченко, В.В. Фомин, В.В. Архипов, А.С. Цветинский

Моделирование гидрометеорологических характеристик в Карском и Печорском морях и расчет наносов у западного побережья полуострова Ямал

Ключевые слова:
морская и атмосферная циркуляция, ветровое волнение, морфо- и литодинамические процессы, численное моделирование.

Keywords:
sea and atmospheric circulation, wind waves, morpho- and lithodynamic processes, numerical simulation.

При проектировании и строительстве гидротехнических сооружений в береговой зоне необходима информация как о динамике поперечного профиля берега, так и о характеристике вдольберегового потока наносов на достаточно большом протяжении берега, поскольку вмешательство в природную среду может нарушить ее равновесное состояние и привести к катастрофическому изменению режима береговой зоны, а также к негативным последствиям при эксплуатации гидротехнических сооружений.

Основное воздействие на морфо- и литодинамические процессы и трансформацию рельефа береговой зоны оказывают ветровые волны и течения [1]. Природа волн и течений определяется метеорологическими факторами, в первую очередь штормовыми ситуациями. Картина штормовых деформаций дна и берегов может быть чрезвычайно многообразной вследствие сложности и нелинейности самой системы «волны – течения – транспорт наносов» [1]. Однако благодаря установлению важных количественных взаимосвязей внутри этой системы в настоящее время становится реальным количественный прогноз морфодинамических изменений конкретных участков побережий, основанный на *численном моделировании* штормовых ситуаций. При этом речь может идти о прогнозе не только в масштабе времени отдельного шторма, но и в более длительной перспективе, измеряемой годами и десятилетиями.

В свою очередь, моделирование штормовых ситуаций подразумевает комплексное воспроизведение атмосферной и морской циркуляции, а также ветрового волнения с помощью соответствующих численных моделей. Именно такому подходу посвящена настоящая статья. Полученные результаты воспроизведения течений и волнения используются для моделирования морфо- и литодинамических процессов в береговой зоне в районе Харасавэйского месторождения (далее – расчетная область).

Методика моделирования гидрометеорологических характеристик для расчета наносов у западного побережья полуострова Ямал

Общая методика расчета транспорта наносов подразумевает решение ряда задач, каждая из которых сама по себе является сложной гидродинамической проблемой. Расчет транспорта наносов базируется на методиках, для которых необходим расчет течений и полей ветрового волнения в расчетной области [1], для чего, в свою очередь, требуется воспроизведение атмосферного воздействия. В настоящей работе для расчета гидрометеорологических параметров используется вычислительный комплекс хорошо апробированных моделей. Расчет атмосферного воздействия проводится по модели WRF (*англ.* Weather Research and Forecasting model); расчет течений, уровня, температуры, солености моря и морского льда – по модели INMOM (*англ.* Institute Numerical Mathematics Ocean Model) [2, 3]; расчет параметров волнения – по Российской атмосферно-волновой модели (РАВМ) [4]. Описание этого комплекса моделей и его верификация применительно к Карскому и Печорскому морям представлены в работе [3].

Блок гидрометеорологического моделирования отличается от такового из работы [3] использованием σ -координатной версии INMOM [2]. Решение итоговой задачи расчета наносов в акватории расчетной области у западного побережья Ямала

требует исходных данных о течениях и характеристиках ветрового волнения с высоким пространственным разрешением. Для расчета течений с требуемой точностью применена версия INMOM для юго-западной части Карского моря и Печорского моря, реализованная на неравномерной сетке с детализацией в акватории Байдарацкой губы, получающейся в модельной сферической системе координат путем размещения ее полюса в точке с географическими координатами $71,151791^\circ$ с.ш. и $67,198387^\circ$ в.д. Таким образом, шаги по пространству составляют порядка 50 м в расчетной области и доходят до 5–10 км на периферии. По вертикали задаются 20 неравномерно распределенных по глубине уровней.

Общий размер сеточной области (рис. 1) составляет в плане 960×295 точек по модельным долготе и широте соответственно. Поскольку используется математически точная сферическая система координат, то никаких топологических искажений при расчете полей течений не вносится, в отличие от зачастую используемых декартовых систем координат, «натягиваемых» на сферичную поверхность Земли. Как видно, «жидкие границы» сеточной области находятся далеко от расчетной области. Описание способа задания условий на «жидких границах» приведено в [3]. В такой постановке течения через Карские Ворота, важные

для формирования циркуляции в Байдарацкой губе, будут автоматически рассчитываться в модели INMOM. Для расчета приливных течений на «жидких границах» ставится условие изменения уровня под действием крупномасштабной приливной волны.

Как уже было сказано, подробная верификация блока расчета гидрометеорологических характеристик приведена в работе [3], поэтому здесь качество расчетов демонстрироваться не будет. Отметим только, что качество воспроизведения гидрометеорологических характеристик отвечает уровню современных возможностей численного моделирования.

Таким образом, для расчета донных отложений и транспорта взвешенных наносов необходимо выполнить следующие виды численного моделирования: 1) расчет атмосферного воздействия по модели WRF на грубой атмосферной сетке; 2) расчет параметров волнения на глубокой воде на атмосферной сетке по RABM; 3) интерполяцию параметров глубоководного волнения на мелкую сетку основной модели течений INMOM и их трансформацию в параметры мелководного волнения согласно топографии дна; 4) расчет параметров напряжения трения, вызванного обрушением волн на малых глубинах; 5) расчет течений по INMOM с учетом приливов и предписанного атмосферного воздействия (см. п. 1); 6) расчет формирования

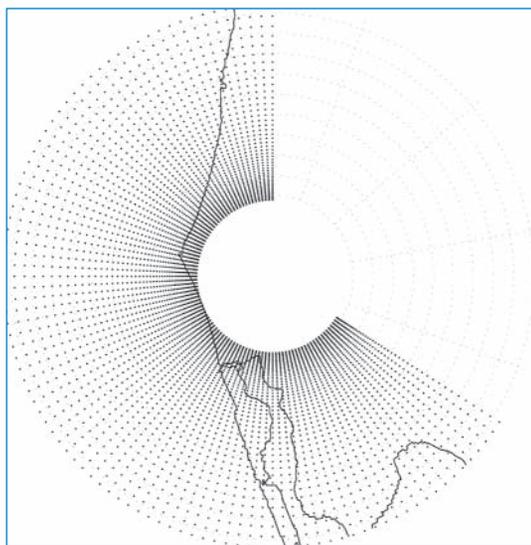
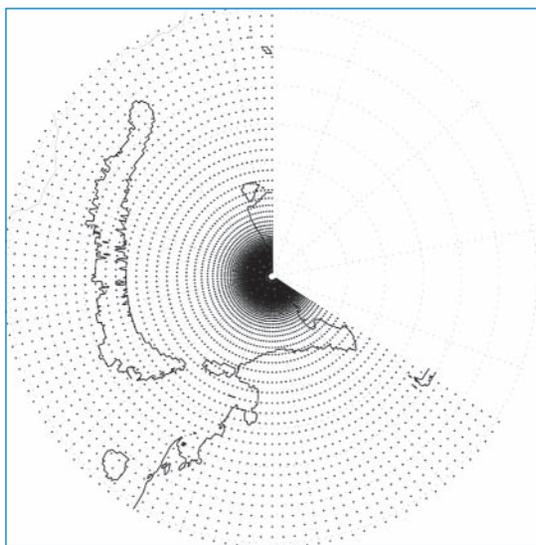


Рис. 1. Сеточная область версии INMOM для Печорского моря с детализацией в акватории Байдарацкой губы:

слева – область моделирования морской циркуляции целиком (показаны каждая 10-я точка по долготе и каждая 3-я точка по широте); справа – детализация сеточной области в расчетной области (показаны каждая 10-я точка по долготе и каждая 3-я точка по широте)

пространственной структуры и среднемноголетних объемных величин потоков илистых наносов в толще морских вод; 7) расчет потоков донных песчаных наносов по методике [1] с использованием рассчитанных полей течений и ветрового волнения. Пункты 6 и 7 реализуются на сеточной области INMOM с использованием необходимых разностных операторов, уже реализованных в ней.

Метод расчета литодинамических процессов

В прибрежных акваториях полуострова Ямал в безледный период происходит перенос большого количества наносов. Эти наносы существенно различаются как по фракционному составу, так и по происхождению. Можно выделить 2 основных типа подобных наносов:

1) влекаемые и сальтирующие наносы, транспортируемые в основном в придонном слое моря;

2) взвешенные наносы, которые транспортируются во всей толще воды.

Экспериментальные исследования, выполненные в 2011–2012 гг., показали, что в грунтах доминирует мелкозернистый песок со средним диаметром частиц $\approx 0,16$ – $0,17$ мм. В то же время экспедиционные данные показали и наличие взвешенных илистых наносов, обязанных своим происхождением интенсивному штормовому разрушению береговых обрывов Карского моря. Средний линейный размер взвешенных частиц по результатам измерений гранулометрического состава взвешенных наносов на акватории Харасавэйского полигона во время экспедиции 2012 г. составил $0,0011$ – $0,0012$ мм.

В связи с тем что физические закономерности транспорта наносов в придонном слое моря и транспорта взвешенных наносов в толще воды отличны друг от друга, то их моделировали по двум различным методикам, которые приведены далее.

Методика расчета транспорта донных наносов. Для расчета потока придонных наносов использовалась энергетическая концепция Р. Бэгнольда [1]. В основу расчетов положено уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}, \quad (1)$$

где q_x – вдольбереговой поток наносов; q_y – поперечный поток наносов; d – изменяющаяся во времени t толщина слоя наносов. В данном слу-

чае использовался алгоритм расчета вектора \mathbf{q} вдольбереговых и поперечных потоков наносов [1]:

$$\mathbf{q} = \left[\frac{3\varepsilon_b}{4\text{tg}\Phi} f_w \rho u_m^2 + \frac{\varepsilon_s}{W_s} \left(\frac{8}{3\pi} f_w \rho u_m^3 + B \right) \right] \bar{\mathbf{u}}, \quad (2)$$

где ε_b и ε_s – отношение мощностей, поглощаемых механизмами донного трения, к мощностям, расходуемым потоком на влечение песка по дну и перемещение сальтирующих частиц, соответственно; ρ – плотность воды; f_w – коэффициент трения для волн; u_m – амплитуда горизонтальной скорости частиц; Φ – угол естественного откоса песчаного грунта (в наших условиях $\text{tg}\Phi \approx 0,6$ [1]); W_s – скорость осаждения частиц в воде ($W_s = 0,155d_s - 0,0075$ [см/с] [1]), где d_s – гидравлическая крупность песка, мм; B – добавочная мощность, связанная с процессом обрушения волн, благодаря которому турбулентность в водной толще и придонном слое усиливается и количество взвешенных частиц значительно возрастает; $\bar{\mathbf{u}}$ – полная переносная скорость песчаных наносов у дна.

При введении обозначений

$$F = \frac{2}{3\pi} f_w \rho u_m^3, \\ G = \frac{9\pi}{8} \frac{\varepsilon_b}{\text{tg}\Phi} \frac{F}{u_m} + \frac{\varepsilon_s}{W_s} (4F + B), \quad (3)$$

где F – потери мощности на донное трение; G – погруженный вес движущихся песчаных зерен на единицу площади, (2) примет вид:

$$\mathbf{q} = G\bar{\mathbf{u}}. \quad (4)$$

Полная переносная скорость у дна $\bar{\mathbf{u}}$ в общем случае представляет собой сумму скорости воды в придонном слое \mathbf{U}_δ и переносной скорости \mathbf{U}_B , обусловленной турбулентными механизмами за счет обрушения волн, действующими в донном пограничном слое:

$$\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{U}_\delta + \mathbf{U}_B. \quad (5)$$

Разложив вектор расхода наносов в формуле (4) на поперечную $q_x = q\cos\Theta$ и продольную $q_y = q\sin\Theta$ составляющие, можно записать:

$$q_x = G(U_\delta + U_B), \\ q_y = G(V_\delta + V_B). \quad (6)$$

Соответствующие компоненты скоростей рассчитывались следующим образом:

$$(U_{\delta}, V_{\delta}) = \frac{(Q_x, Q_y)}{h \left(\ln \frac{h}{z_a} - 1 \right)}; \quad (7)$$

$$(U_B, V_B) = \alpha \frac{D^* - D}{D^*} \frac{u_m^2}{C} (\cos \Theta, \sin \Theta),$$

$$D^* = \frac{EC_g}{X} \cos \Theta, \quad (8)$$

здесь Q_x и Q_y – полные потоки из модели течений (9); h – глубина; z_a – шероховатость; D – скорость диссипации; D^* – пороговая скорость диссипации; X – расстояние от берега; E – полная энергия волн; C_g – групповая скорость; для нахождения u_m , $\cos \Theta$ и $\sin \Theta$ используется ветроволновая модель РАВМ.

Методика расчета транспорта взвешенных наносов. Составляющие удельного расхода (транспорта) взвешенных наносов определяются из следующих выражений:

$$Q_x = \int_0^D u c dz, \quad Q_y = \int_0^D v c dz, \quad (9)$$

где c – объемная концентрация взвешенных наносов; u , v – горизонтальные составляющие скорости течения, вычисляемые в трехмерной термодинамической модели; D – полная глубина.

Объемная концентрация взвешенных наносов вычисляется при помощи уравнения переноса-диффузии взвешенных частиц, которое в σ -координатной системе INMOM имеет вид:

$$\frac{\partial Dc}{\partial t} + \frac{1}{r_x r_y} \left[\frac{\partial}{\partial x} (r_y D u c) + \frac{\partial}{\partial y} (r_x D v c) \right] + \frac{\partial (\omega + \omega_s) c}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{v}{D} \frac{\partial c}{\partial \sigma} + Fc + q_c(x, y, \sigma, t), \quad (10)$$

где x , y , σ , t – координатная система; c – концентрация взвешенных частиц; u , v – горизонтальные компоненты скорости течения; ω – вертикальная составляющая скорости в σ -системе координат; r_x , r_y – метрические коэффициенты сферической системы координат со смещенными полюсами; $\omega_s = \frac{1}{18} \frac{gd^2(\rho_c - \rho)}{\mu}$ – гра-

витационная вертикальная скорость оседания взвешенных частиц (скорость седиментации или гидравлическая крупность), рассчитываемая по формуле Стокса (d – средний диаметр частиц взвеси, ρ_c – плотность частиц взвеси,

μ – молекулярная вязкость воды); $D = H + \zeta$ (H – глубина места в невозмущенном состоянии; ζ – отклонение уровня моря от невозмущенного состояния); v – вертикальный коэффициент турбулентной диффузии, который берется таким же, как и для температуры и солёности в INMOM; F – оператор боковой диффузии; $q_c(x, y, \sigma, t)$ – источники взвешенных частиц, в общем случае меняющиеся в пространстве и времени. При численной реализации (10) используется монотонная схема переноса, не дающая ложных экстремумов [5].

Уравнение (10) описывает изменение концентрации взвешенных частиц в условиях, учитывающих перенос примеси течениями, горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузией, а также физические характеристики частиц взвеси. Для решения уравнения (10) применительно к поверхности ставится условие отсутствия потока взвешенных частиц, применительно к дну – оседания/взвешивания частиц:

$$\frac{v}{D} \frac{\partial c}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=1} = \omega_s c \Big|_{\sigma=1} f_d, \quad (11)$$

где f_d – параметр оседания/взвешивания.

На боковых границах задается условие отсутствия потока взвешенных частиц, за исключением участков береговой границы, с которых осуществляется вынос взвеси. На этих участках ставится следующее условие (12) для потока концентрации взвешенных веществ:

$$q_c = a \frac{gh^2}{\omega_s^3 T} \chi(\xi) V, \quad (12)$$

где a – безразмерный эмпирический коэффициент; g – ускорение свободного падения; h – высота волны; ω_s – гидравлическая крупность; T – период волны; ξ – суммарное изменение уровня (волновое и стонно-нагонное); V – модуль вдольбереговой скорости. Функция

$$\chi(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi \leq 0 \\ \xi, & \xi > 0 \end{cases} \text{ в формуле (12) ис-}$$

пользуется для того, чтобы учесть только нагонный суммарный уровень: как только уровень становится меньше 0, то размыв прекращается.

Верификация расчета транспорта взвешенных наносов необходима прежде всего для того, чтобы выбрать в формуле (12) значение безразмерного эмпирического коэффициента a . Последний обычно берется в пределах 10^{-11} – 10^{-13} . Для верификации использовались

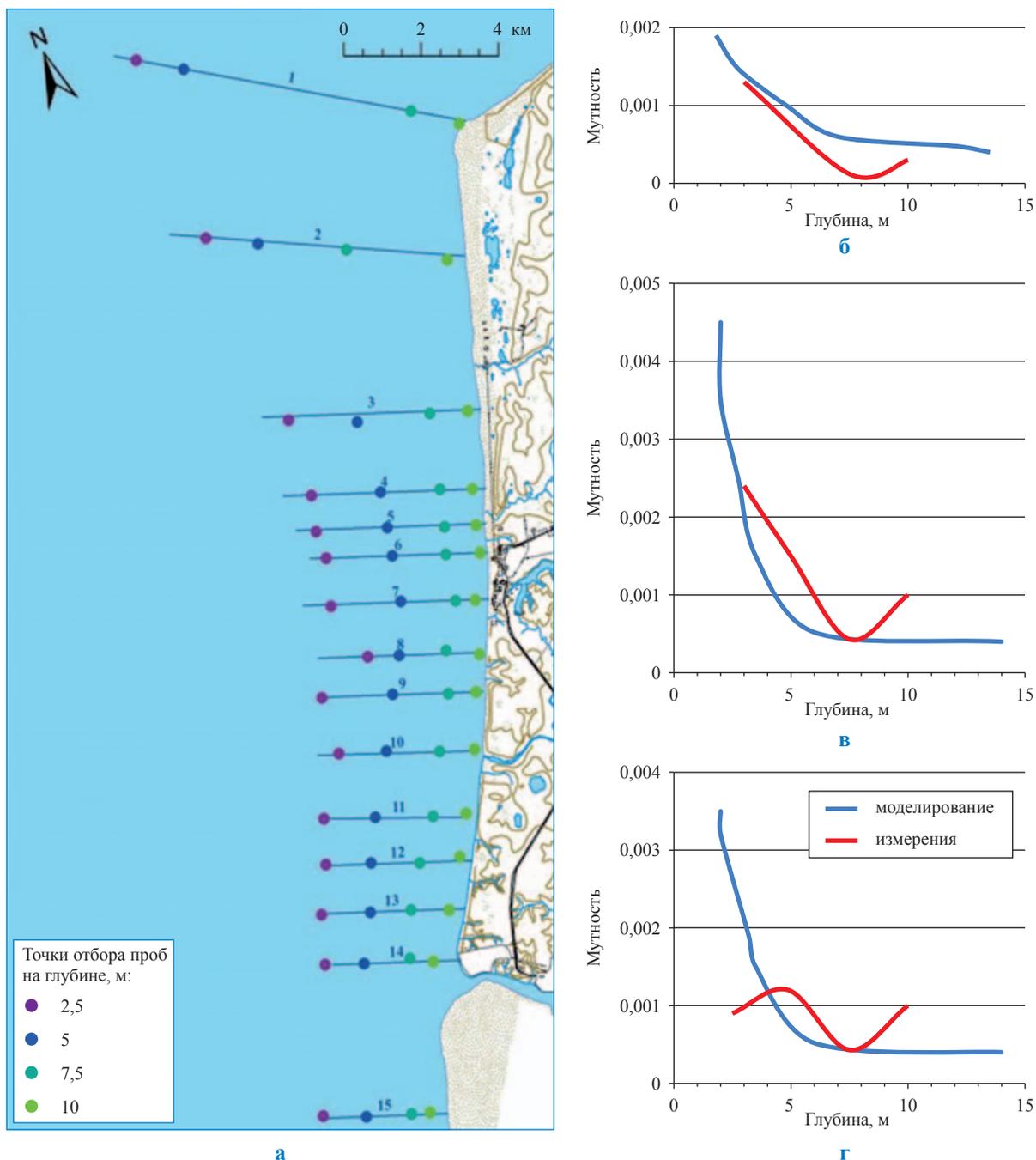


Рис. 2. Положение створов отбора проб (а) и сравнение наблюдаемых (красная линия) и модельных (синяя линия) придонных профилей мутности, мг/л, на створах: б – 1; в – 5; г – 11

профили мутности, построенные по данным, полученным 13–14.09.2011 г. на 15 створах (рис. 2, см. а).

Для сравнения результатов расчета мутности с данными наблюдений (см. рис. 2б–г) данные расчетов показаны с суточным осреднением за 14 сентября 2011 г. Согласно рис. 2 модель транспорта взвешенных наносов достоверно воспроизводит измеренные профили мутности.

Расчет структуры донных наносов и величин потоков взвешенных наносов

Как уже было показано, в прибрежных акваториях полуострова Ямал в безледный период происходит перенос наносов разного гранулометрического состава, для моделирования перемещения которых применяются различные методики (см. ранее). В соответствии с ними проведены расчеты для безледных (август – октябрь) периодов 2009–2012 гг. (рис. 3, 4).

Следует отметить, что для расчета расходов для 2010 г. и 2012 г. в модели введен учет влекомых наносов, в то время как для 2009 г. и 2011 г. при расчетах учитывалось только перемещение наносов путем сальтации. Поэтому рассчитанные вдольбереговые расходы песчаных наносов для 2009 г. и 2011 г. меньше, чем для 2010 г. и 2012 г. Различие между результатами расчета расходов песчаных донных наносов для 2010 г. и 2012 г. объясняется различной продолжительностью безледного периода. В 2012 г. безледный период длился на 1 месяц дольше, чем в 2010 г., поэтому в 2012 г. и поток наносов оказался больше. По-видимому, в качестве характерных климатических величин вдольберегового переноса донных наносов следует опираться на расчеты для 2010 г., когда продолжительность безледного периода была близка к климатической. Значения, полученные для 2009 г. и 2011 г. (практически равные между собой), можно использовать в качестве характерных величин перемещения наносов путем сальтации, а разность между значениями 2010 г. и 2009 (2011) гг. – в качестве характерных величин перемещения наносов путем влечения.

Для безледных периодов 2010 г. и 2012 г. хорошо видно, что расходы через створы № 7 и № 8 (см. рис 3), лежащие к югу от подходного канала, существенно превышают расходы через створы № 1–6, лежащие к северу от канала. Так как для безледных периодов 2009 г. и

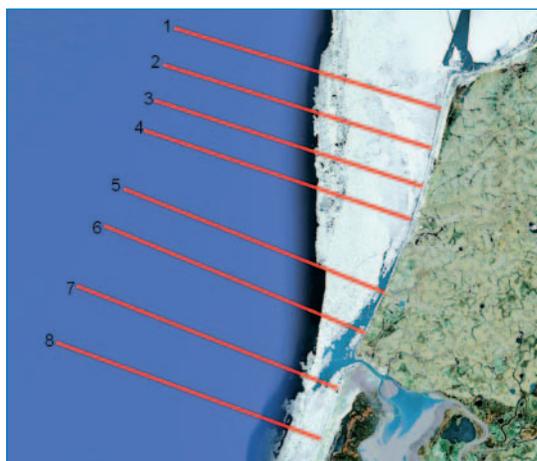


Рис. 3. Схема расположения створов, для которых проводились расчеты транспорта наносов за 2009–2011 гг. применительно к Харасавэйскому полигону в целом и к подходному каналу порта в устье реки Харасавэй в частности

2011 г. (для которых не учтен транспорт влекомых наносов) такой закономерности не наблюдается, можно заключить, что к югу от подходного канала резко возрастает транспорт влекомых наносов.

На рис. 5 цветом показаны расчетные мощности песчаных отложений в сантиметрах: положительные значения соответствуют накоплению наносов, отрицательные – их размыву. Для всех периодов отчетливо видны занесение подходного канала и размыв грунта подводного продолжения месторождения Харасавэй. Следует отметить, что процесс аккумуляции/размыва наносов как сильно нестационарный зависит от волнения, приливных и сгонно-нагонных течений. Поэтому схемы отложений (см. рис. 5) соответствуют итоговым состояниям на конец каждого безледного периода в течение четырех лет. Нестационарность заносимости канала проявляется в том, что в зависимости от синоптической ситуации он может и размываться. Но в целом литодинамическая ситуация способствует его занесению, что и отражено на рис. 5.

Высокая концентрация наносов на Харасавэйском полигоне наблюдается в основном вдоль берега (рис. 6, см. а), что хорошо согласуется с данными натурных наблюдений и объясняет максимумы расходов взвешенных наносов вблизи берега. Инструментальная погрешность определения концентрации взвешенных наносов составляет 0,0001 %, т.е. все концентрации ниже этого значения следует считать чистой водой, в которой не происходит транспорта взвешенных наносов. Транспорт взвешенных наносов происходит во вдольбереговой полосе шириной не более 10 км.

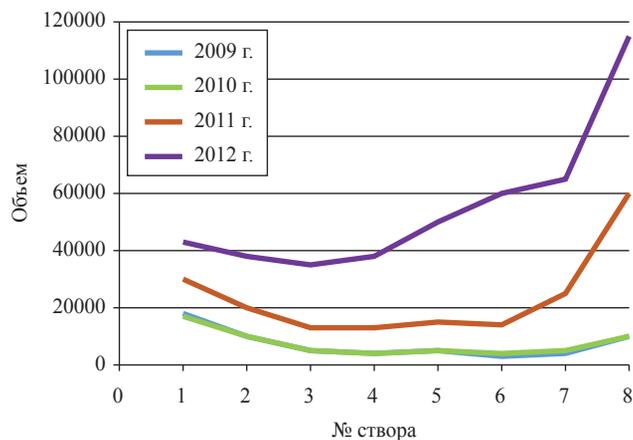


Рис. 4. Результирующие через створы № 1–8 (см. рис. 3) вдольбереговые расходы донных песчаных наносов за 2009–2012 гг., м³

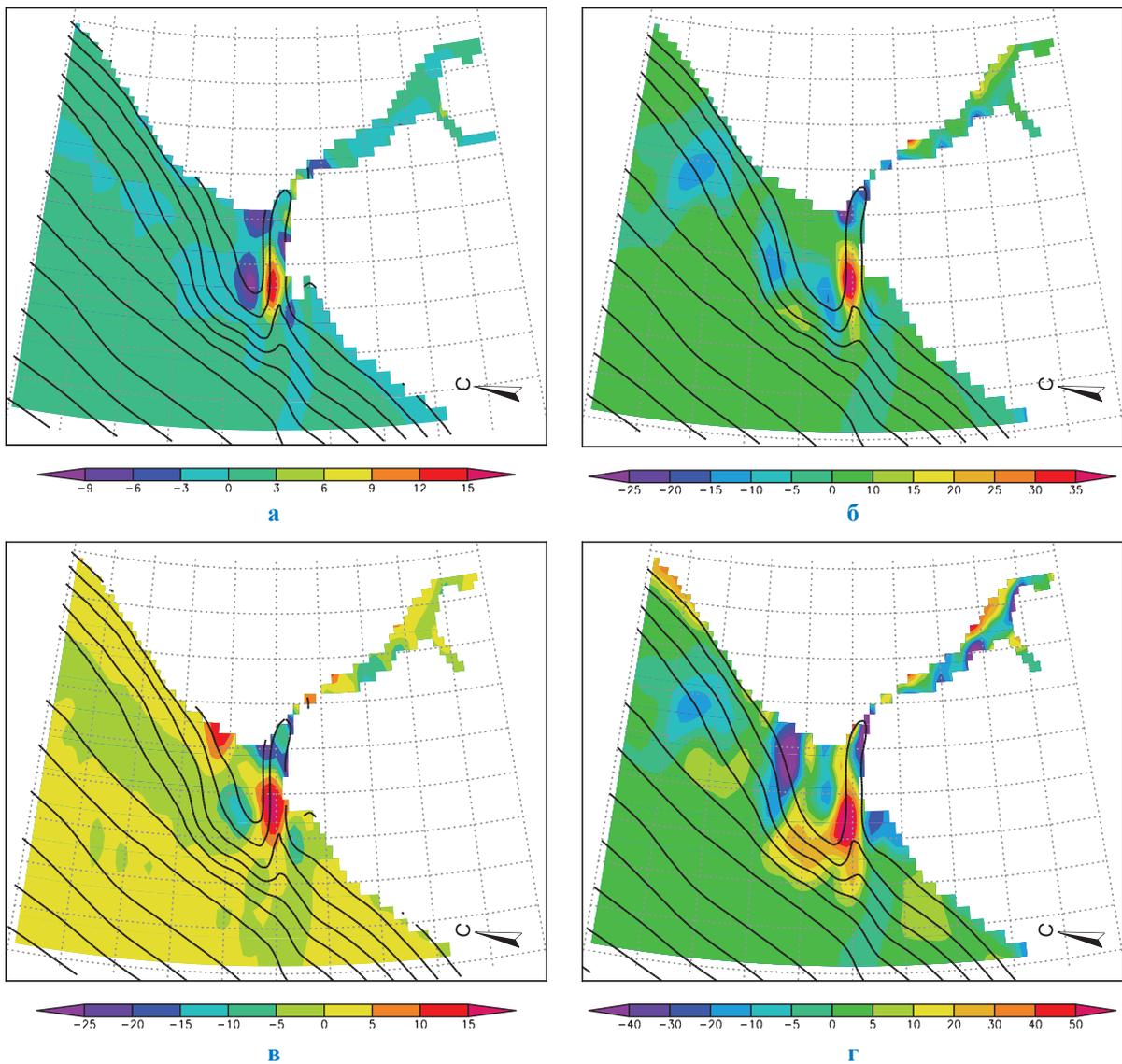


Рис. 5. Отложения донных наносов в районе Харасавэйского подходного канала за 4 безледных периода в 2009–2012 гг. (соответственно а, б, в, г): изолиниями показана топография дна, м

Необходимо отметить, что на рис. 5, 6 показаны мощности илистых отложений в «сухом» виде. Поэтому для определения реальной мощности илистых осадений (они должны быть больше) нужно вводить поправку, которую, в свою очередь, необходимо выявить из данных наблюдений. В целом в канале отмечается отложение илистых наносов.

Таким образом, реализован современный комплекс моделирования, позволяющий рассчитывать характеристики атмосферного воздействия, ветрового волнения, гидротермодина-

мические характеристики морской циркуляции (скорости течений, температуру, соленость, уровень моря, толщину и сплоченность морского льда), транспорта и отложения наносов. Полученные характеристики хорошо согласуются с данными натурных наблюдений в ходе экспедиционных работ в Байдарацкой и Обской губах и в районе Харасавэйского месторождения. В частности, получены характеристики структуры и величины потока наносов для района Харасавэйского месторождения, а также выявлена изменчивость рельефа подводного берегового склона.

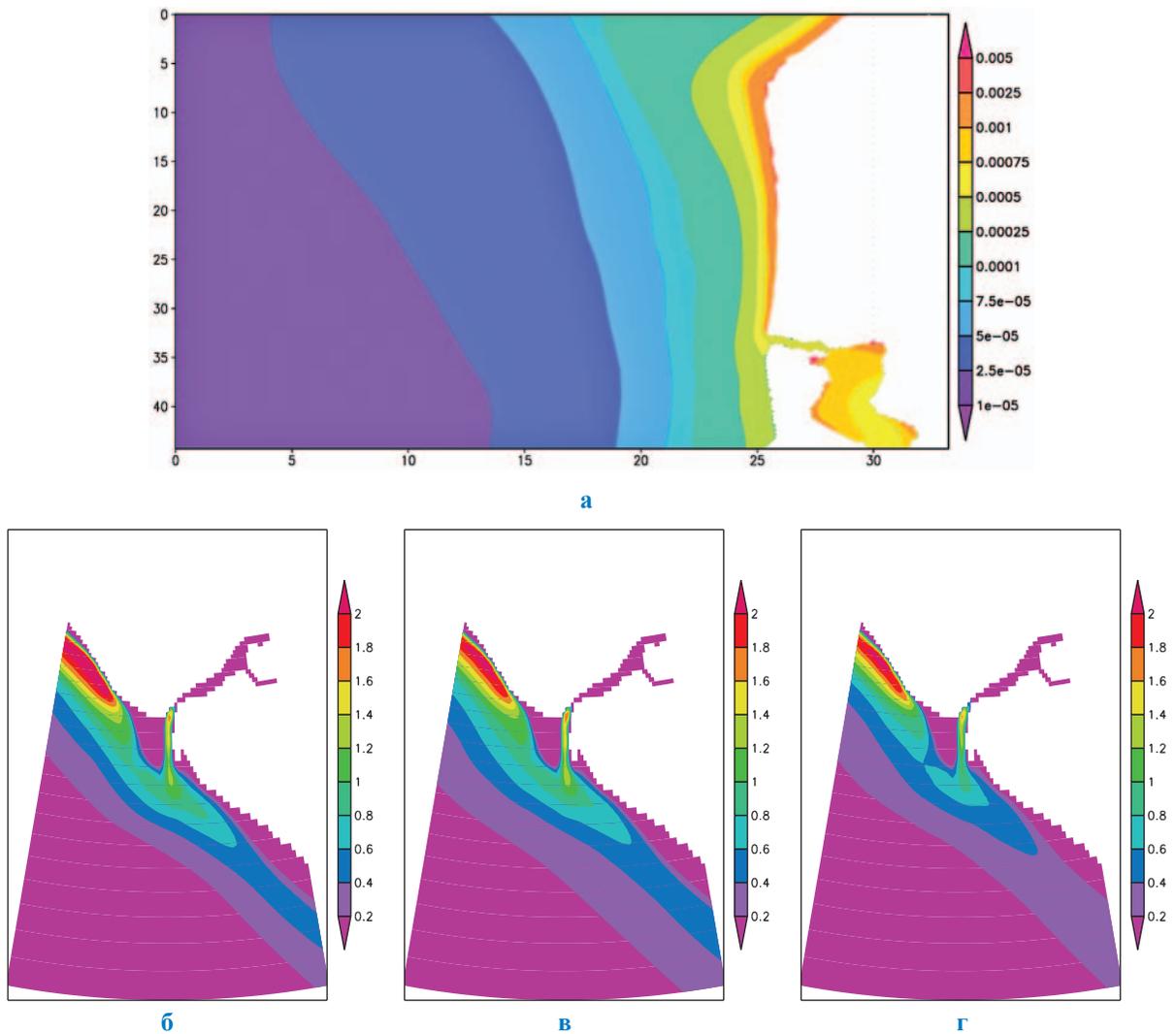


Рис. 6. Средняя за безледный период расчетная концентрация, %, взвешенных наносов на Харасавэйском полигоне (а) и расчетная мощность осажденных илистых наносов, мм, за безледные периоды 2009 г. (б), 2010 г. (в) и 2012 г. (г)

Список литературы

1. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов / И.О. Леонтьев. – М.: Геос, 2001. – 272 с.
2. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия / Н.А. Дианский. – М.: Физматлит, 2013. – 272 с.
3. Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики / Н.А. Дианский, В.В. Фомин, И.М. Кабатченко, В.М. Грузинов // Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 1 (13). – С. 57–73.
4. Кабатченко И.М. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море / И.М. Кабатченко, Г.В. Матушевский, М.В. Резников, М.М. Заславский // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 5. – С. 61–71.
5. Дианский Н.А. Особенности распространения загрязнений в северо-западной части Тихого океана / Н.А. Дианский, А.В. Гусев, В.В. Фомин // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 247–266.