

## ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 556:624.21

**А.Р. Введенский\***, **Н.А. Дианский\***, **И.М. Кабатченко\***,  
**Г.И. Литвиненко\*\***, **М.В. Резников\***, **В.В. Фомин\***

*\*ФГБУ «ГОИН», ФБОУ ВО «МГАВТ»*

### ЛИТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ СТРОИТЕЛЬСТВА МОСТА ЧЕРЕЗ КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ\*

**Аннотация.** При проектировании и возведении гидротехнических сооружений в море необходимы сведения об эволюции донной топографии в районе строительства, а также о возможных деформациях дна, обусловленных как естественными причинами, так и появлением в акватории новых гидротехнических объектов. Предлагается анализ литодинамических процессов в акватории строительства моста через Керченский пролив. Приведены основные этапы расчетов: от сбора исходной информации до сведения воедино результатов численных экспериментов по нескольким математическим моделям. Особое внимание уделено картине аккумуляции наносов и размывов в зоне гидротехнических работ при возведении временных причалов и водных путей к ним.

**Ключевые слова:** деформация дна, размыв грунта, расчет наносов, обработка морфометрических измерений, моделирование морских процессов для гидротехнического строительства, режим гидрометеорологических условий

**DOI:** 10.22227/1997-0935.2016.11.78-91

Для расчетов и описания литодинамических процессов в районе строительства Керченского моста в проведенном исследовании задействовано несколько физико-математических моделей. Условно их можно разделить на две группы: атмосферную и водную. Атмосферная часть представлена американской региональной моделью атмосферной циркуляции WRF версии 3.3, разработанной организациями NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR (National Center of Atmospheric Research) [1]. Эта модель была реализована для района Азово-Черноморского бассейна. Задействовалась версия WRF с открытым кодом, доступная через Интернет. Остальные модели (условно водная часть) разработаны в России. Деформации дна, размывы или намывы берегов происходят, главным образом, под воздействием течений и волнения. Кратко механизм процесса можно представить следующим образом: волнение размывает донные грунты и породы, а течения переносят частицы от мест размыва. Для расчета донных наносов в исследовании использовалась «энергетическая» эмпирическая модель Р. Бэгнольда [2], которая основывается на известных полях течений и волнения. Для расчета последних применяются хорошо апробированные модель морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [3] и модель ветрового волнения PABM (Российская атмосферно-волновая модель) [4–7], в которой рассчитывались

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-35-00502 мол\_а)

поля течений и волнения. Атмосферный форсинг (ветровое воздействие) для локальных реализаций моделей INMOM и RABM рассчитывался по региональной модели WRF. Описание этого комплекса гидрометеорологических моделей и его верификация применительно к Карскому и Печорскому морям представлено в [8]. А весь комплекс моделей, включая модель литодинамики, которая задействована для моделирования гидрометеорологических характеристик в Карском и Печорском морях и расчет наносов у западного побережья полуострова Ямал представлен в [9].

Схема всей цепочки расчета показана на рис. 1, где видно, каким образом при расчете наносов используются атмосферный модуль, волновой модуль, модуль расчета течений и, наконец, модуль транспорта наносов.

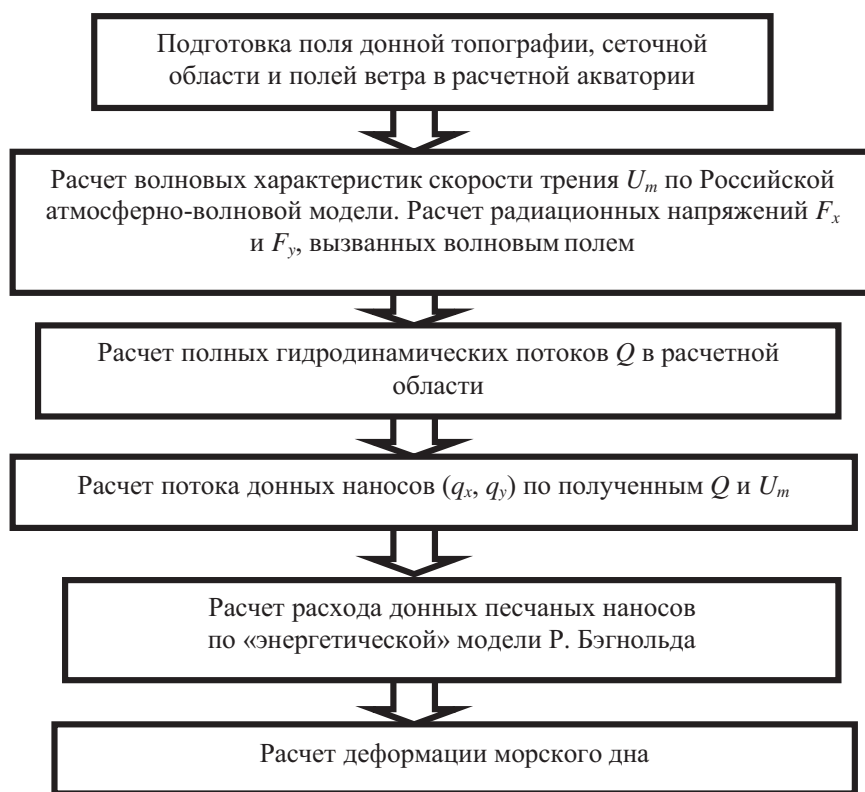


Рис. 1. Схема расчета прибрежной литодинамики

Многие важные характеристики гидрометеорологического режима могут быть получены только путем моделирования. Волнение, течение и, следовательно, литодинамика в первую очередь определяются качеством расчета полей ветра над морем. Используемая здесь для этой цели модель WRF в силу ее высокого качества и удобства применения принята во многих зарубежных и отечественных центрах для воспроизведения и прогноза региональной атмосферной циркуляции. Методика расчета характеристик атмосферного форсинга заключается в интегрировании негидростатической системы уравнений гидротермодинамики в региональной области. Граничными и начальными условиями служат данные итогового объективного ана-

лиза поля объективного анализа и прогноза GSF (Global Forecasting System) из NCEP. Данные о подстилающей поверхности взяты из архива MODIS, их пространственное разрешение составляет 30 угловых секунд. В численных расчетах для модели WRF использована сетка с шагом:  $0,08^\circ$  по широте и  $0,08^\circ$  по долготе. Выдача результатов атмосферных расчетов проводилась каждые 3 ч.

Использованная при моделировании морских течений версия INMOM адаптирована к условиям Керченского пролива и всей акватории Черного и Азовского морей. Это сделано для того, чтобы учесть в полном объеме физические факторы водообмена между Черным и Азовским морями, которые определяют течения в Керченском проливе. Версия INMOM реализована в повернутой системе координат. Сеточная область модели получена путем переноса полюсов в точки с координатами  $36,158321^\circ$  в.д.  $45,265857^\circ$  с.ш. для северного полюса и  $37,134731^\circ$  в.д.  $45,249368^\circ$  с.ш. для южного полюса. Поскольку используется математически точная сферическая система координат, то никаких топологических искажений при расчете полей течений не вносится. Примененная методология расчета течений с захватом заведомо большей области, повышает точность расчета циркуляции для района, на котором сфокусирована плотность расчетной сетки, и позволяет обойти проблему задания условий на жидких границах пролива. Интенсивные течения в Керченском проливе могут формироваться вследствие ветрового возбуждения длинных волн и сейшевых колебаний в Азовском море. Его акватория практически полностью охвачена расчетной сеткой высокого пространственного разрешения, соответственно, указанные волны моделируются с хорошей точностью. На рис. 2 представлена сеточная область для акватории Черного и Азовского морей. На рис. 3 дается детализация сеточной области для Тузлинского створа мостового перехода. В модельной системе координат сеточная область составляет  $720 \times 296$  узлов по долготе и широте, шаг по пространству —  $0,5^\circ$ . При пересчете для географической системы координат максимальная детализация достигается в районе Тузлинской косы. На протяжении всего участка предполагаемого строительства мостового перехода разрешение составляет 150...200 м. При удалении от зоны строительства разрешение увеличивается и на периферии Азовского моря уже равно до 2...3 км.

Следует отметить, что такой подход со сгущением сетки в расчетной области с успехом применялся для расчета распространения загрязнений в акватории Большого Сочи [11].

Для задания глубин использовались навигационные карты, а также данные промерных работ, выполненных при проведении полевых изысканий. Для задания начальных условий по температуре и солености использованы данные МГИ НАНУ [12], представляющие собой трехмерные среднемесячные климатические поля для акватории Черного моря с пространственным разрешением порядка 25...50 км, которые интерполировались на сеточную область модели.

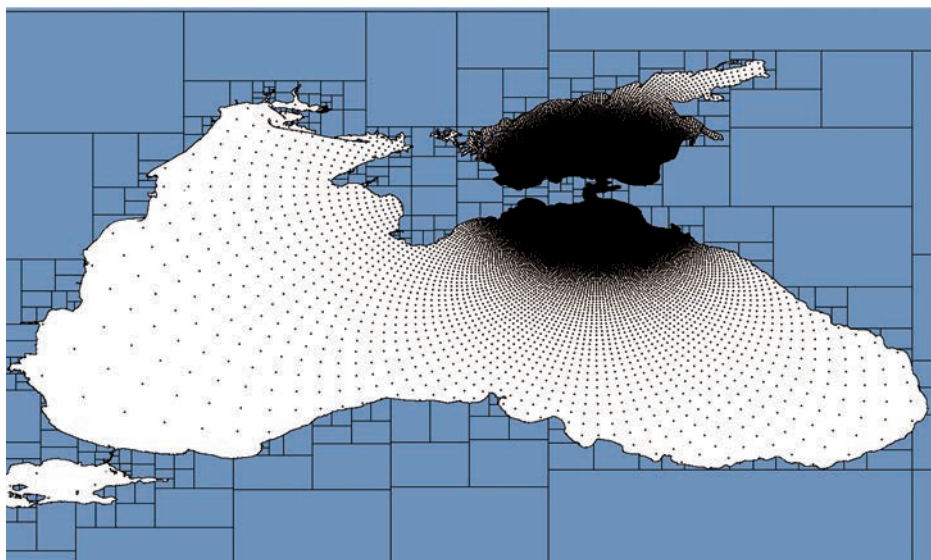


Рис. 2. Сеточная область INMOM над акваторией Черного и Азовского морей (точками показаны узлы сеточной области)

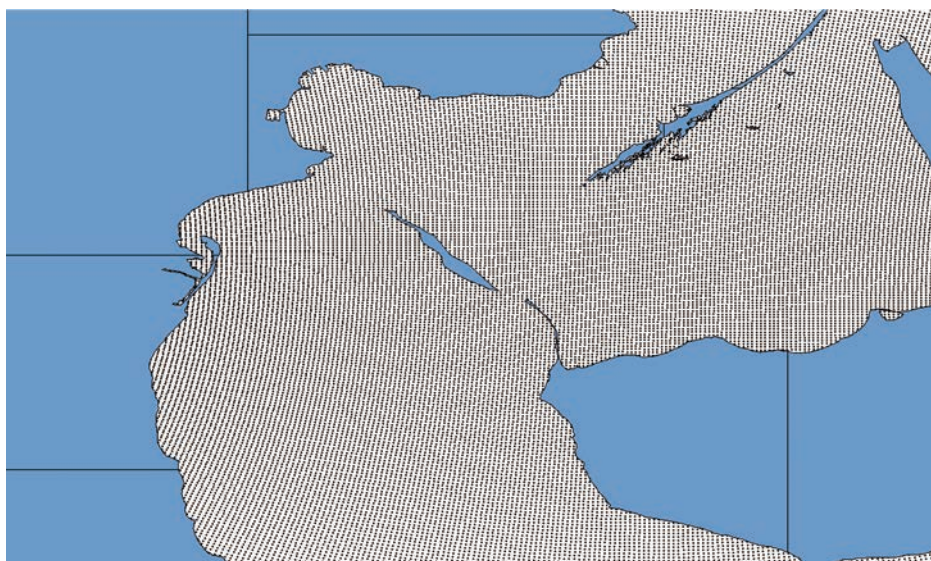


Рис. 3. Детализированная сеточная область INMOM в районе Тузлинского створа (точками показаны узлы сеточной области)

Сток рек для акватории Черного моря задается по данным климатического года CORE [13]. Для Азовского моря влияние рек определяется более точно путем пересчета реального стока Дона и Кубани в изменения уровня и солености в устьях этих рек.

Одним из основных факторов гидродинамического воздействия и размыва донных грунтов является ветровое волнение. Для моделирования спектра ветрового волнения использована модель РАВМ. При разработке этой модели академиком РАН В.Е. Захаровым предложен теоретически строгий спо-

соб упрощения кинетического интеграла — основного механизма снабжения энергией длинноволнового (энергонесущего) интервала спектра. Он основан на регулярной процедуре упрощения общего интеграла нелинейных взаимодействий. Отличие от известных моделей состоит в том, что один из основных членов функции источников и стоков в уравнении переноса волнового действия — это член, описывающий нелинейный обмен энергии в спектре волн, который задается с использованием «узконаправленного» упрощения исходного интеграла. Смысл упрощения заключается в следующем. Интеграл нелинейных взаимодействий (кинетический интеграл) сводится к дифференциальному виду регулярной процедурой разложения исходного интеграла в ряд по параметру «узконаправленности», который оказывается малым для реальных функций углового распределения энергии в двухмерном спектре волн. Предлагаемое упрощение является единственной теоретически обоснованной процедурой среди известных решений.

Входными данными для РАВМ следующие: рельеф дна, сведения о колебаниях уровня, приливных и других течениях, сведения о ледовитости моря. Поскольку волнение на глубокой воде зависит только от ветра, то глубоководная версия модели РАВМ рассчитывается на сетке модели WRF. Для пересчета волнения с учетом его трансформации на мелководье используется сетка, аналогичная сеточной области INMOM, изображенной на рис. 2–3.

Полученные по адаптированным моделям INMOM и РАВМ данные о течениях и волнении необходимы для реализации модели Бэгнольда по расчету донных размывов в исследуемой акватории.

Приведем основные положения «энергетической» концепции Бэгнольда. Частицы грунта, перемещаемые водой в морях и океанах, называются наносами. Потоки воды захватывают эти частицы со дна моря или его берегов. Геометрические размеры частиц, транспортируемых в исследуемой акватории, разнятся от тысячных до десятых долей миллиметра. Столь разные по своему происхождению и размерам частицы транспортируются разными способами. У дна песчаные наносы перемещаются либо путем перекачивания, либо путем скачка (сальтаций). Высота сальтаций измеряется несколькими диаметрами частиц. Часть зерен поднимается в поток на значительно большую высоту и описывает беспорядочные траектории под действием турбулентных пульсаций. В этом случае можно говорить о движении взвешенных частиц. Масштаб турбулентных скоростей характеризуется динамической скоростью  $U^*$ . Перенос твердых частиц во взвешенном состоянии возможен при условии:

$$U^* > \omega_s, \quad (1)$$

где  $\omega_s$  — гидравлическая крупность, находящаяся в квадратичной зависимости от геометрического размера частиц и определяемая по формуле Стокса

$$\omega_s = \frac{1}{8} \frac{gd^2(\rho_c - \rho)}{\mu}, \quad (2)$$

где  $d$  — средний диаметр частиц взвеси;  $\rho_c$  — плотность частиц взвеси;  $\rho$  — плотность воды;  $\mu$  — молекулярная вязкость воды.

Данное условие разделяет характер транспорта наносов на придонный и взвешенный в толще воды. Песок может транспортироваться во взвешенном состоянии в рассматриваемой акватории относительно недалеко от дна, где в условиях придонного волнового пограничного слоя наблюдается необходимая динамическая скорость. Выше, где турбулентность генерируется вертикальным градиентом течений, динамическая скорость ниже и во взвешенном состоянии находятся лишь пыль и илы. Характер донных грунтов в указанной акватории показал, что они формируются донными наносами (в данном случае песками), а фракции с меньшей гидравлической крупностью выносятся в более глубоководные районы. В силу этого при моделировании учитывался только транспорт донных наносов. Основная характеристика  $G$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ , учитывающая интенсивность этого явления, характеризует суммарный объем увлекаемых твердых частиц на единицу площади.

В основу расчетов донных деформаций вследствие потока донных песчаных наносов было положено уравнение сохранения объема увлекаемых частиц:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}, \quad (3)$$

где  $q_x$  — элементарный объемный расход наносов в долготном направлении,  $\text{м}^3/\text{м} \cdot \text{с}$ ;  $q_y$  — меридиональный элементарный объемный расход наносов,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $d$  — глубина, м.

В данной формуле использовался алгоритм расчета элементарного объемного расхода наносов [14, 15]:

$$q_x = G * (U_\delta + U_B); \quad (4)$$

$$q_y = G * (V_\delta + V_B), \quad (5)$$

где  $U_\delta, V_\delta$  — компоненты скоростей в придонном слое, рассчитываемые по осредненной по глубине горизонтальной циркуляции;  $U_B, V_B$  — переносные скорости, обусловленные механизмами, действующими в донном пограничном слое за счет волнения.

Практический интерес к литодинамическим процессам в гидротехническом строительстве объясняется их влиянием на деформацию дна. Соответственно, качество численной модели с практической точки зрения оценивается по тому, насколько достоверно модель реконструирует деформации дна. Оценка применимости всех указанных моделей произведена путем сравнения результатов численного эксперимента для акватории в Керченском проливе за 2014 г., для которого имелись данные наблюдений полученные в ходе проведения экспедиционных работ ФГБУ «ГОИН». Было смоделировано изменение топографии дна за период с мая по ноябрь 2014 г. и результаты сравнили с данным морфометрических измерений за тот же период.

На рис. 4 показана средняя за период с мая по ноябрь 2014 г. динамика изменения дна, полученная по данным морфометрических измерений при проведении экспедиционных исследований в летний и осенний сезоны. На рис. 5 представлена средняя с мая по ноябрь 2014 г. динамика изменения рельефа дна, полученная по модельным расчетам. Сравнение рис. 4 и 5 показывает их

схожесть. Так, берега о. Тузла размываются со стороны Черного моря и, наоборот, намываются со стороны Таманского залива. Это объясняется большей волновой активностью в силу географических особенностей именно со стороны Черного моря. Такая же картина наблюдается у дамбы. В Павловской узкости и Тузлинском проране и расчеты, и измерения показывают размывы. Заметим, что модельные расчеты охватывают большую акваторию, чем данные промеров.

Результаты сравнения данных измерений и моделирования позволяют сделать вывод о применимости модели к расчету литодинамических процессов в исследуемой акватории.



Рис. 4. Изменение топографии дна, м, в летний и осенний периоды 2014 г., составленное по результатам изысканий

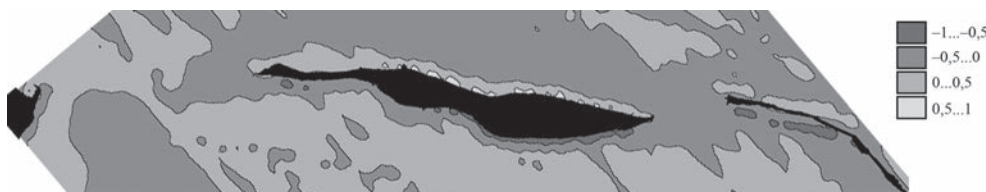


Рис. 5. Изменение топографии дна, м, за период с мая по ноябрь 2014 г., составленное по результатам моделирования

На время строительства моста в акватории Керченского пролива предполагается сооружение временных причалов для приема строительных конструкций. Оценка занесения песком подходных каналов и разворотных кругов, сопутствующих этим причалам, является важной задачей для обеспечения бесперебойной работы строительства. После оценки применимости модельного комплекса произведены практические расчеты возможных донных деформаций, сопряженных с гидротехническим строительством в исследуемой акватории. Для расчета деформаций дна у временной площадки Тамань было проведено численное моделирование литодинамических изменений при наличии дноуглубления и при естественной топографии дна для условий 2014 г. Моделирование проводилось методом вложенных сеток. Горизонтальное разрешение сеточной области составило 20 м. Для этой области данные по волнению и течениям интерполировались из полученных по основным моделям.

Для оценки влияния дноуглубления на литодинамические характеристики в районе временной площадки Тамань была построена интегральная карта разницы деформаций дна за год при наличии дноуглубления и при естественной топографии дна (рис. 6). Данная площадка находится южнее косы Тузла рядом с Таманским полуостровом. Анализ результатов показал, что существенные деформации дна при наличии площадки дноуглубления наблюдаются по бровкам канала, а также по кромке разворотного круга. Максимальные положительные и отрицательные деформации дна расположены непосредственно в канале и составляют от  $-25$  см в районе южной бровки канала до  $25$  см в районе северной. Около южной кромки разворотного круга наблюдается размыв с амплитудами до  $11 \dots 16$  см, в области северной кромки разворотного круга наблюдается намыв с амплитудами до  $9 \dots 11$  см в год. Непосредственного на акватории разворотного круга существенных изменений в деформации дна не наблюдается.

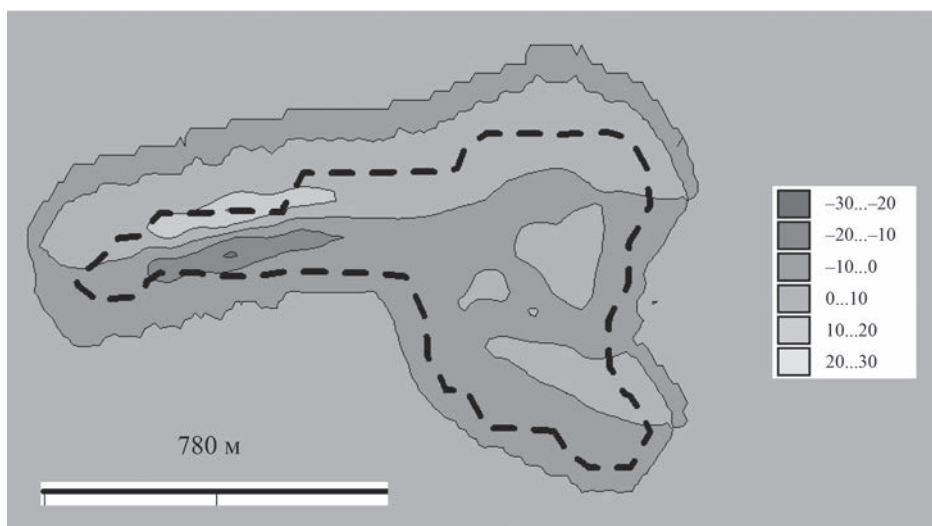


Рис. 6. Интегральные намывы и размывы, см, за год в акватории предполагаемого временного причала у п-ова Тамань, пунктирной линией отмечена граница дноуглубления

Для оценки влияния дноуглубления на литодинамические характеристики в районе временной площадки Тузла была построена интегральная карта разницы деформаций дна при наличии дноуглубления и при естественной топографии дна (рис. 7). Данная площадка находится севернее о. Тузла и хорошо защищена от черноморских волн. Анализ результатов показал, что в области дноуглубительных работ существенных деформаций дна не наблюдается. По кромке разворотного круга, а также на бровках канала отмечен размыв дна с максимальными амплитудами до  $1$  см за год в южной и юго-западной частях разворотного круга, внутри которого выявлена область аккумуляции донных наносов с максимальными амплитудами до  $1$  см за год в южной части разворотного круга.





Рис. 7. Интегральные наносы и размывы, см, за год в акватории предполагаемого временного причала у о. Тузла, пунктирной линией отмечена граница дноуглубления

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- тестовые результаты моделирования картины наносов и размывов показали хорошую согласованность с данными измерений, а значит, предложенный комплекс моделей применим для расчетов литодинамических процессов при гидротехническом строительстве в исследуемом районе;
- ожидаемое влияние гидротехнических работ на литодинамические характеристики по результатам модельных расчетов у п-ова Тамань: деформации дна после дноуглубления ожидаются по бровкам подходного канала, а также по кромке разворотного круга. Максимальные (от  $-25$  до  $25$  см) деформации дна в самом канале. Для района собственно разворотного круга существенных деформации дна не выявлено;
- оценка влияния гидротехнических работ на литодинамические характеристики по результатам модельных расчетов в районе временной площадки Тузла значимых деформаций дна не выявила;
- тщательные локальные адаптации моделей INMOM и PABM к району исследования позволили обеспечить эмпирическую модель Бэнгольда качественными данными и в итоге произвести литодинамические расчеты для уникального по масштабам и стратегической важности морского гидротехнического сооружения без использования зарубежных моделей и программных продуктов с закрытыми кодами;
- оригинальные алгоритмы и численные схемы основных модельных блоков экономят время расчетов и не требуют гигантских вычислительных мощностей суперкомпьютеров.

Расчет наносов в зоне строительства Керченского моста произведен с использованием морфометрических данных экспедиций ФГБУ «ГОИН», открытых данных международных метеорологических центров на базе отечествен-

ных математических моделей и программных решений. Авторы выражают искреннюю благодарность участникам экспедиций ФГБУ «ГОИН» за качественные данные измерений.

### Библиографический список

1. *Skamarock A.* Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Notes, 2008.
2. *Bagnold R.A.* Mechanics of marine sedimentation. The Sea. N.Y. : J. Wiley, 1963. Vol. 3. Pp. 507–528.
3. *Дианский Н.А.* Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М. : Физматлит, 2013. 271 с.
4. *Захаров В.Е., Смилга А.* О квазиоднородных спектрах слабой турбулентности // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1981. Т. 81. Вып. 4 (10). С. 318–326.
5. *Zaharov V.E., Zaslavskii M.M., Kabatchenko I.M., Matushevskii G.V., Polnikov V.G.* Conceptually new wind-wave model // Proc. of Air-Sea Interface Symposium (11–15 January 1999, Sydney). Australia.
6. *Кабатченко И.М., Матушевский Г.В., Резников М.В., Заславский М.М.* Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 61–71.
7. *Абузаров З.К., Нестеров Е.С., Лукин А.А., Давидан И.Н., Дымов В.И., Кабатченко И.М., Вращкин А.Н.* Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / под ред. Е.С. Нестерова. М. : Информполиграф, 2013. 292 с.
8. *Дианский Н.А., Фомин В.В., Кабатченко И.М., Грузинов В.М.* Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1 (13). С. 57–73.
9. *Дианский Н.А., Кабатченко И.М., Фомин В.В., Архипов В.В., Цвейцинский А.С.* Моделирование гидрометеорологических характеристик в Карском и Печорском морях и расчет наносов у западного побережья полуострова Ямал // Вести газовой науки. 2015. № 2 (22). С. 98–105.
10. NCEP. Global Forecasting System. Режим доступа: <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs>.
11. *Дианский Н.А., Фомин В.В., Жохова Н.В., Коршенико А.Н.* Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 664–675.
12. *Belokopytov V.N.* Ocean Station Tool: Software package for processing and analysis of oceanographic data // International Marine Data and Information Conference — IMDIC (May, 31 – June 3, 2005). Brest, France, 2005. P. 67.
13. *Large W., Yeager S.* Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies // NCAR Technical Note: NCAR/TN-460+STR. CGD Division of the National Center for Atmospheric Research. 2004.
14. *Демьяшев С.Г.* Численный прогностический расчет течений в черном море с высоким горизонтальным разрешением // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 1. С. 36–47.
15. *Korotaev G.K., Oguz T., Nikiforov A.A., Koblinsky C.J.* Seasonal, interannual and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from assimilation of altimeter data into a reduced-gravity model // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. No. C4. 3122.

16. *Кныш В.В., Демьшев С.Г., Кубряков А.И., Моисеенко В.А., Мизюк А.И., Инюшина Н.В., Мартынов М.В., Коротаев Г.К.* Сопоставление результатов реанализа гидрофизических полей Черного моря, выполненного по моделям в  $\sigma$ - и  $z$ -координатах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2011. № 24. С. 19–37.

17. *Kubryakov A.I., Korotaev G.K. Dorofeev V.L., Ratner Y.B., Palazov A., Valchev N., Malciu V., Mateescu R., Oguz T.* Black Sea coastal forecasting system // Ocean Sci. 2012. 8. Pp. 183–196.

18. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния переменного по пространству и времени ветра на течения, сгонно-нагонные процессы и распространение примеси в Азовском море // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 69–79.

19. *Анцыферов С.М., Косьян Р.Д.* Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М. : Наука, 1986. 223 с.

20. *Косьян Р.Д., Крыленко В.В., Куклев С.Б.* Хрупкое равновесие Анапской пересыпи // Природа. 2012. № 2. С. 19–28. Режим доступа: <http://priroda.ras.ru/pdf/2012-02.pdf>.

21. *Косьян Р.Д., Крыленко В.В., Крыленко М.В.* Особенности рельефа и строение южной части анапской пересыпи // Геоморфология, 2012. № 4. С. 73–80.

22. *Косьян Р.Д., Крыленко В.В.* Современное состояние аккумулятивных морских берегов Краснодарского края и их использование. М. : Научный мир, 2014. 256 с. Режим доступа: [http://artlib.osu.ru/web/books/content\\_all/4896.pdf](http://artlib.osu.ru/web/books/content_all/4896.pdf).

23. *Леонтьев И.О.* Прибрежная динамика: волны течения, потоки наносов. М. : ГЕОС, 2001. 272 с.

24. *Леонтьев И.О.* Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с.

*Поступила в редакцию в сентябре 2016 г.*

Об авторах: **Введенский Алексей Ростиславович** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, **Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова (ФГБУ «ГОИН»)**, 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6, [a\\_r\\_v@mail.ru](mailto:a_r_v@mail.ru);

**Дианский Николай Ардальянович** — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, **Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова (ФГБУ «ГОИН»)**, 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6; ведущий научный сотрудник, **Институт вычислительной математики Российской академии наук (ИВМ РАН)**, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8, [nikolay.diansky@gmail.com](mailto:nikolay.diansky@gmail.com);

**Кабатченко Илья Михайлович** — доктор географических наук, руководитель лаборатории, **Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова (ФГБУ «ГОИН»)**, 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6; профессор, **Московская государственная академия водного транспорта (ФБОУ ВО «МГАВТ»)**, 115407, г. Москва, ул. Судостроительная, д. 44, [wawelab1@yandex.ru](mailto:wawelab1@yandex.ru);

**Литвиненко Геннадий Иванович** — доктор технических наук, профессор, **Московская государственная академия водного транспорта (ФБОУ ВО «МГАВТ»)**, 115407, г. Москва, ул. Судостроительная, д. 44; генеральный директор, **НПК «МорТрансНииПроект»**, 127434, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 9б, стр. 2, [litgi@mail.ru](mailto:litgi@mail.ru);

**Резников Михаил Вячеславович** — научный сотрудник, **Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова (ФГБУ «ГОИН»)**, 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6, [ww1-m@yandex.ru](mailto:ww1-m@yandex.ru);

**Фомин Владимир Васильевич** — научный сотрудник, **Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова (ФГБУ «ГОИН»)**, 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6, [lihar\\_89@mail.ru](mailto:lihar_89@mail.ru).

Для цитирования: Введенский А.Р., Дианский Н.А., Кабатченко И.М., Литвиненко Г.И., Резников М.В., Фомин В.В. Литодинамические процессы в зоне строительства моста через Керченский пролив // Вестник МГСУ. 2016. № 11. С. 78–91. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.78-91

A.R. Vvedenskiy, N.A. Dianskiy, I.M. Kabatchenko, G.I. Litvinenko,  
M.V. Reznikov, V.V. Fomin

## LITHODYNAMIC PROCESSES IN THE CONSTRUCTION AREA OF A BRIDGE ACROSS THE KERCH STRAIT

**Abstract.** The information about the evolution of the bottom topography in the construction area is necessary in the design and construction of hydraulic structures in sea, as well as information about possible deformations of the bottom caused by both natural reasons and the appearance of new hydraulic objects in the waters. In the given research the authors propose an analysis of lithodynamic processes in the area of the construction of the bridge across the Kerch Strait. Several physico-mathematical models were used for calculation and description of lithodynamic processes in the construction site of the Kerch Bridge. They may be divided into two groups: atmospheric and water. Many important properties of hydrometeorological conditions may be obtained only by modeling. The model WRF is used in the research, which is applied in many foreign and domestic centers for simulation and forecast of regional atmospheric circulation due to its high quality and ease. The main steps of the calculations are provided: beginning with the collection of basic information up to combining the results of numerical experiments on several mathematical models. Special attention is paid to sedimentation and erosion associated with construction of temporary piers and waterways to them.

**Key words:** seabed deformation, coastal erosion, calculation of sedimentation, processing of morphometric measurements, modeling of marine processes for hydrotechnical construction, hydrometeorological conditions

### References

1. Skamarock A. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Notes, 2008.
2. Bagnold R.A. Mechanics of Marine Sedimentation. The Sea. N. Y., J. Wiley, 1963, vol. 3, pp. 507–528.
3. Dianskiy N.A. *Modelirovanie tsirkulyatsii okeana i issledovanie ego reaktivnoy na korotkoperiodnykh i dolgoperiodnykh atmosferykh vozddeystviyakh* [Modeling Ocean Circulation and Investigation of Its Response to Short-Period and Long-Period Atmospheric Effects]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 271 p. (In Russian)
4. Zakharov V.E., Smilga A. O kvaziodnorodnykh spektrakh slaboy turbulentsosti [On Quasihomogeneous Light Turbulence Spectra]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics]. 1981, vol. 81, no. 4 (10), pp. 318–326. (In Russian)
5. Zaharov V.E., Zaslavskii M.M., Kabatchenko I.M., Matushevskii G.V., Polnikov V.G. Conceptually New Wind-Wave Model. Proc. of Air-Sea Interface Symposium (11–15 January 1999, Sydney). Australia.
6. Kabatchenko I.M., Matushevskiy G.V., Reznikov M.V., Zaslavskiy M.M. Modelirovanie vetra i voln pri vtorichnykh termicheskikh tsiklonakh na Chernom more [Modeling Wind and Waves in Case of Secondary Cyclones on the Black Sea]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2001, no. 5, pp. 61–71. (In Russian)
7. Abuzyarov Z.K., Nesterov E.S., Lukin A.A., Davidan I.N., Dymov V.I., Kabatchenko I.M., Vrazhkin A.N. *Rezhim, diagnostika i prognoz vetrovogo volneniya v okeanakh i moryakh* [Regime, Diagnosis and Forecast of Wind Waves on Oceans and Seas]. Moscow, Informpoligraf Publ., 2013, 292 p. (In Russian)

8. Dianskiy N.A., Fomin V.V., Kabatchenko I.M., Gruzinov V.M. Vosproizvedenie tsirkulyatsii Karskogo i Pechorskogo morey s pomoshch'yu sistemy operativnogo diagnoza i prognoza morskoy dinamiki [Simulating Circulations of the Kara and Pechora Seas Using the System of Operational Diagnosis and Forecast of Sea Dynamics]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [The Arctic: Ecology and Economy]. 2014, no. 1 (13), pp. 57–73. (In Russian)
9. Dianskiy N.A., Kabatchenko I.M., Fomin V.V., Arkhipov V.V., Tsvetsinskiy A.S. Modelirovanie gidrometeorologicheskikh kharakteristik v Karskom i Pechorskome moryakh i raschet nanosov u zapadnogo poberezh'ya poluoostrova Yamal [Modeling Hydrotechnical Features in the Kara and Pechora Seas and Calculation of Sedimentation near West Coast of Yamal Peninsula]. *Vesti gazovoy nauki* [Current issues of gas production]. 2015, no. 2 (22), pp. 98–105. (In Russian)
10. NCEP. Global Forecasting System. <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs>.
11. Dianskiy N.A., Fomin V.V., Zhokhova N.V., Korshenko A.N. Raschet techeniy i rasprostraneniya zagryazneniya v pribrezhnykh vodakh Bol'shogo Sochi [Calculation of Streams and Distribution of Pollution in Coastal Waters of the Big Sochi]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2013, vol. 49, no. 6, pp. 664–675. (In Russian)
12. Belokopytov V.N. Ocean Station Tool: Software Package for Processing and Analysis of Oceanographic Data. International Marine Data and Information Conference — IMDIC (May, 31 – June 3, 2005). Brest, France, 2005, p. 67.
13. Large W., Yeager S. Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea-Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies. NCAR Technical Note: NCAR/TN-460+STR. CGD Division of the National Center for Atmospheric Research. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.5065/D6KK98Q6>.
14. Demyshev S.G. Chislenny prognosticheskiy raschet techeniy v chernom more s vysokim gorizontal'nym razresheniem [Numerical Trend Calculation of Flows in the Black Sea with High Horizontal Resolution]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal* [Physical Oceanography]. 2011, no. 1, pp. 36–47. (In Russian)
15. Korotaev G.K., Oguz T., Nikiforov A.A., Koblinsky C.J. Seasonal, Interannual and Mesoscale Variability of the Black Sea Upper Layer Circulation Derived from Assimilation of Altimeter Data into a Reduced-Gravity Model. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. C4, 3122. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2002JC001508>.
16. Knysh V.V., Demyshev S.G., Kubryakov A.I., Moiseenko V.A., Mizyuk A.I., Inyushina N.V., Martynov M.V., Korotaev G.K. Sopostavlenie rezul'tatov reanaliza gidrofizicheskikh poley Chernogo morya, vpolnennogo po modelyam v  $\sigma$ - i z-koordinatakh [Correlation of the Reanalysis Results of Hydrophysical Fields of the Black Sea Conducted According to Models in  $\sigma$ - and z Coordinates]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon morya* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zone of the Sea]. 2011, no. 24, pp. 19–37. (In Russian)
17. Kubryakov A.I., Korotaev G.K., Dorofeev V.L., Ratner Y.B., Palazov A., Valchev N., Malciu V., Mateescu R., Oguz T. Black Sea Coastal Forecasting System. *Ocean Sci.* 2012, 8, pp. 183–196.
18. Ivanov V.A., Cherkesov L.V., Shul'ga T.Ya. Issledovanie vliyaniya peremennogo po prostranstvu i vremeni vetra na techeniya, sgonno-nagonnye protsessy i rasprostranenie primesi v Azovskom more [Investigation of the Influence of Space- and Time-Variant Wind on the Flows, Offshore and Wind-Driven Processes and Distribution of Impurities in the Azov Sea]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2012, no. 8, pp. 69–79. (In Russian)
19. Antsyferov S.M., Kos'yan R.D. *Vzveshennyye nanosy v verkhney chasti shel'fa* [Suspended Load in Upper Layers of Shelf]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 223 p. (In Russian)
20. Kos'yan R.D., Krylenko V.V., Kuklev S.B. Khrupkoe ravnovesie Anapskoy peresypi [Delicate Balance of the Anapa Bay-Bar]. *Priroda* [Nature]. 2012, no. 2, pp. 19–28. Available at: <http://priroda.ras.ru/pdf/2012-02.pdf>. (In Russian)
21. Kos'yan R.D., Krylenko V.V., Krylenko M.V. Osobennosti rel'efa i stroenie yuzhnoy chasti anapskoy peresypi [Peculiar Features of the Relief and the Configuration of the South Part of the Anapa Bay-Bar]. *Geomorfologiya* [Geomorphology RAS]. 2012, no. 4, pp. 73–80. (In Russian)

22. Kos'yan R.D., Krylenko V.V. *Sovremennoe sostoyanie akkumulyativnykh morskikh beregov Krasnodarskogo kraya i ikh ispol'zovanie* [Modern State of Accretion Sea Coasts of the Krasnodar Region and Their Use]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2014, 256 p. Available at: [http://artlib.osu.ru/web/books/content\\_all/4896.pdf](http://artlib.osu.ru/web/books/content_all/4896.pdf). (In Russian)

23. Leont'ev I.O. *Pribrezhnaya dinamika: volny techeniya, potoki nanosov* [Coastal Dynamics: Stream Waves, Deposits Drifts]. Moscow, GEOS Publ., 2001, 272 p. (In Russian)

24. Leont'ev I.O. *Morfodinamicheskie protsessy v beregovoy zone morya* [Morphodynamic Processes in Coastal Sea Zone]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 251 p. (In Russian)

About the authors: **Vvedenskiy Aleksey Rostislavovich** — Candidate of Technical Sciences, leading research worker, **Federal State Budgetary Institution "N.N. Zubov's State Oceanographic Institute" (FSBI "SOI")**, 6 Kropotkinskiy pereulok, Moscow, 119034, Russian Federation; [a\\_r\\_v@mail.ru](mailto:a_r_v@mail.ru);

**Dianskiy Nikolay Ardal'yanovich** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, leading research worker, **Federal State Budgetary Institution "N.N. Zubov's State Oceanographic Institute" (FSBI "SOI")**, 6 Kropotkinskiy pereulok, Moscow, 119034, Russian Federation; leading research worker, **Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences (IVM RAN)**, 8 Gubkina str., Moscow, 119333, Russian Federation; [nikolay.diansky@gmail.com](mailto:nikolay.diansky@gmail.com);

**Kabatchenko Il'ya Mikhaylovich** — Doctor of Geographical Sciences, head of the laboratory, **Federal State Budgetary Institution "N.N. Zubov's State Oceanographic Institute" (FSBI "SOI")**, 6 Kropotkinskiy pereulok, Moscow, 119034, Russian Federation; Professor, **Moscow State Academy of Water Transport (MSAWT)**, 44 Sudostroitel'naya str., Moscow, 115407, Russian Federation; [wavelab1@yandex.ru](mailto:wavelab1@yandex.ru);

**Litvinenko Gennadiy Ivanovich** — Candidate of Technical Sciences, Professor **Moscow State Academy of Water Transport (MSAWT)**, 44 Sudostroitel'naya str., Moscow, 115407, Russian Federation; Director General, **NPK MorTransNIIProekt Co.**, 9b building 2 Dmitrovskoe shosse, Moscow, 127434, Russian Federation; [litgi@mail.ru](mailto:litgi@mail.ru);

**Reznikov Mikhail Vyacheslavovich** — research worker, **Federal State Budgetary Institution "N.N. Zubov's State Oceanographic Institute" (FSBI "SOI")**, 6 Kropotkinskiy pereulok, Moscow, 119034, Russian Federation; [wwl-m@yandex.ru](mailto:wwl-m@yandex.ru);

**Fomin Vladimir Vasil'evich** — research worker, **Federal State Budgetary Institution "N.N. Zubov's State Oceanographic Institute" (FSBI "SOI")**, 6 Kropotkinskiy pereulok, Moscow, 119034, Russian Federation; [lihar\\_89@mail.ru](mailto:lihar_89@mail.ru).

For citation: Vvedenskiy A.R., Dianskiy N.A., Kabatchenko I.M., Litvineko G.I., Reznikov M.V., Fomin V.V. *Litodinamicheskie protsessy v zone stroitel'stva mosta cherez Kerchenskiy proliv* [Lithodynamic Processes in the Construction Area of a Bridge Across the Kerch Strait]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 11, pp. 78–91. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.78-91