

Гидролитодинамические условия движения наносов через Балтийский пролив (Калининградский залив, Балтийское море)

Р. Б. Закиров*, Б. В. Чубаренко, В. А. Чечко

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

**e-mail: kotruslan2@gmail.com*

Аннотация

В районе пролива, связывающего Калининградский залив с Балтийским морем, проведены работы по уточнению рельефа дна, отбору донных отложений, измерению течений в разные сезоны и установке набора наносоуловителей на четырех горизонтах в придонном 2-метровом слое. По геоморфологическим признакам выделены зоны осадконакопления. На основе натуральных данных изучены гидролитодинамические условия движения взвешенных наносов и общий характер седиментообмена залива с морем. Движение взвешенного материала через пролив осуществляется как при затоках, так и при оттоках, при этом илистая и мелкая песчаная взвесь преимущественно выносятся из залива в море, а мелкая, средняя и крупная песчаные фракции, наоборот, заносятся в залив и подпитывают нагонную дельту (мель со стороны залива). Отложения нагонной дельты состоят в основном из мелко- и среднезернистого песка. Предполагается, что поток песчаных наносов достигает нагонной дельты (как конечной зоны депонирования) не в полном объеме, часть объема извлекается в процессе регулярного дноуглубления в проливе. В результате этого нагонная дельта развивается медленнее, чем могла бы в естественных условиях.

Ключевые слова: пролив, эстуарий, нагонная дельта, лагуны, донные осадки, взвесь, течения, натурные измерения

Благодарности: авторы благодарны коллегам В. Т. Паке, А. О. Коржу, А. А. Кондрашову за аппаратное обеспечение измерений течений, А. Н. Бабакову за советы и подготовку оснащения наносонакопителей, В. С. Пинчуку и коллегам-волонтерам за участие в экспедиционных работах. Полевые работы выполнены в рамках договора о сотрудничестве Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Атлантическое отделение) с БФУ им. И. Канта от 3.07.2019 №4/2019 (1358) за счет поддержки проекта РФФИ 19-35-90069, интерпретация – за счет госзадания ИО РАН (тема № FM WE-2021-0016).

Для цитирования: Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Чечко В. А. Гидролитодинамические условия движения наносов через Балтийский пролив (Калининградский залив, Балтийское море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 52–68. EDN ZKQZYX. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-52-68

© Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Чечко В. А., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Hydrolithodynamic Conditions of Sediment Movement through the Strait of Baltiysk (Vistula Lagoon, Baltic Sea)

R. B. Zakirov*, B. V. Chubarenko, V. A. Chechko

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: kotruslan2@gmail.com*

Abstract

In the area of the strait connecting the Vistula Lagoon with the Baltic Sea, the work was carried out to refine the bottom topography, collect bottom sediments, measure currents in different seasons, and install a set of sediment traps at 4 horizons in the 2-meter bottom layer. The sediment accumulation zones were identified on the basis of the bathymetric data according to geomorphological features. On the basis of *in situ* data, we studied the hydrolithodynamic conditions of suspended sediment movement through the strait and the general nature of sediment exchange. The suspended material moves through the strait both during inflows and outflows, while silt and fine sand are mainly transported from the lagoon into the sea, while fine, medium and coarse sands, on the contrary, are brought into the lagoon and feed the surge delta (a shallow area from the direction of the lagoon). Surge delta sediments mainly consist of fine and medium sand. It was assumed that the flow of sand sediments does not reach the surge delta (the final deposition zone) in full, part of the volume entering the strait is removed during regular maintaining dredging in the strait. Consequently, the surge delta develops more slowly than it could do naturally.

Key words: strait, estuary, surge delta, lagoons, bottom sediments, suspended sediments, currents, sampling, field measurements

Acknowledgements: the authors are grateful to colleagues V.T. Pak a, A.O. Korzh, A.A. Kondrashov for instrumentation support of current measurements, to A.N. Babakov for advice and preparation of sediment collection equipment, to V.S. Pinchuk and volunteer colleagues for participation in the expedition works. The fieldwork was carried out under cooperation agreement no. 4/2019 (1358) as of 3.07.2019 between Shirshov Institute of Oceanology RAS (Atlantic Branch) and Immanuel Kant Baltic Federal University and funded under RFBR project 19-35-90069 support, interpretation is funded under state assignment of IO RAS (topic no. FMWE-2021-0016).

For citation: Zakirov, R.B., Chubarenko, B.V. and Chechko, V.A., 2022. Hydrolithodynamic Conditions of Sediment Movement through the Strait of Baltiysk (Vistula Lagoon, Baltic Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 52–68. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-52-68

1. Введение

Калининградский/Вислинский залив (рис. 1) – это второй по площади трансграничный водоем лагунного типа [1] на побережье Балтийского моря. Российская часть акватории (56.2 %) на официальных картах называется Калининградским заливом, а польская часть – Вислинским заливом [2]. Залив отделен от моря песчаной Балтийской/Вислинской косой [2] и свободно соединяется с ним естественной протокой, которая не имеет официального названия, но в научной литературе, начиная с классической публикации [3], значится как

Балтийский пролив¹⁾ (далее – пролив). Будучи ядром природно-технической системы [4] входного участка Калининградского морского канала (КМК)²⁾, пролив является важным звеном в системе обеспечения транспортной доступности порта Калининград. С осени 2022 г. это уже не единственное соединение залива с морем – в южной части косы открыт искусственно прорытый судоходный канал³⁾, оборудованный шлюзом, который перекрывает свободный водообмен залива с морем. Акватория залива служит приемным водоемом для рек Преголи, Пасленки, Прохладной, Эльблонг, Бауды, Мамонки-Бонувки, Нельмы, Ногат и др., в нее поступают как морские (17 км³/год), так и речные (3.5 км³/год) воды, а вместе с ними терригенный и биогенный материал [3, 5, 6].

После почти полного зарегулирования стока р. Ногат в 1916 г. поступление речных вод и наносов в акваторию залива резко сократилось и возросла роль водообмена через Балтийский пролив [3]. Седиментационный баланс акватории залива был нарушен и, по некоторым предположениям, еще не достиг равновесия [6]. По оценкам [5, 7, 8], через Балтийский пролив из моря в акваторию залива ежегодно заносится 76.5 тыс. т осадочного материала (из их 60 % биогенной взвеси), а из залива в море выносится 348.4 тыс. тонн в год (70 % биогенной взвеси). В основе этих оценок лежат кратковременные гидрологические измерения течений в Балтийском проливе, полученные в ходе полевых работ 1951–1965 гг. [3], и результаты численного моделирования [6, 8–10].

По результатам анализа батиметрических данных ранее нами было выполнено морфометрическое описание песчаной отмели на входе в Калининградский залив из пролива [11] и эрозионной депрессии между входными парными молами мористой оконечности пролива [12], а по результатам гидрологических измерений была выявлена связь между динамикой уровня моря и водообменом залива с морем [13]. Установлено [12], что объем эрозионной депрессии ниже изобаты 12 м составляет 1.13 млн м³. В 2008–2016 гг. депрессия увеличивала свои размеры со скоростью 2450 м³/год. Песчаная отмель на входе в Калининградский залив [11] имеет кольцеобразную форму с прорезающими ее промывными каналами, объем отмели выше изобаты 2.5 м оценивается в 6.5 млн м³, за период 2012–2019 гг. по всей ее поверхности отмечена деформация. Полученные ранее результаты свидетельствуют об активных гидродинамических процессах на входе и выходе из пролива.

¹⁾ Название «Балтийский пролив» отсутствует в реестре географических названий Калининградской области (URL: <https://cgkipd.ru/science/names/reestry-gkgn.php>). В англоязычной литературе (см. *Szydłowski M., Arichowicz W., Zima P.* Analysis of the water level variation in the Polish part of the Vistula Lagoon (Baltic Sea) and estimation of water inflow and outflow transport through the Strait of Baltiysk in the years 2008–2017 // *Water*. 2021. Vol. 13, iss. 10. 1328. doi:10.3390/w13101328) встречается название Strait of Baltiysk (в связи с расположением около г. Балтийска).

²⁾ Калининградский морской судоходный канал тянется вдоль северного берега Калининградского залива от пролива до устья р. Преголи и является судоходной артерией, связывающей порт Калининград с Балтийским морем.

³⁾ Канал официально открыт для судоходства с 17.09.2022 г.

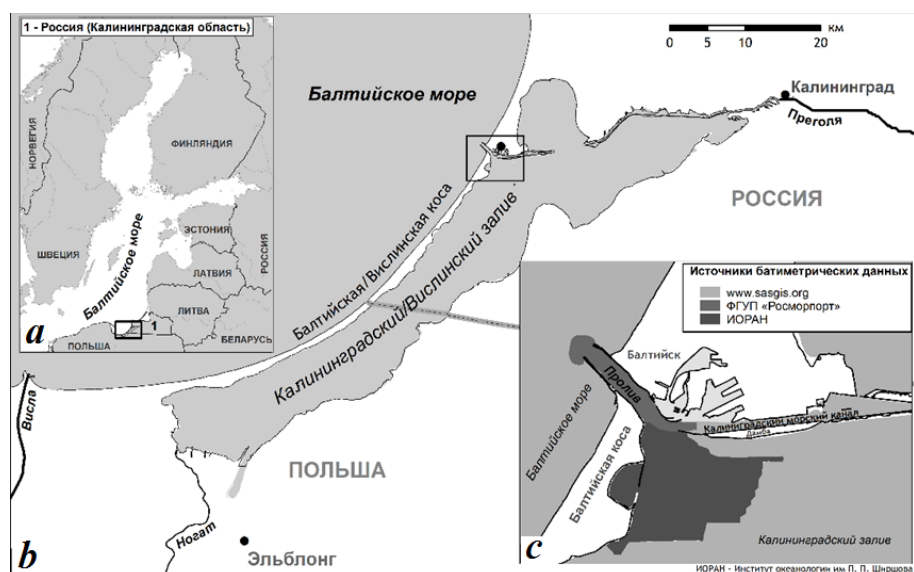


Рис. 1. Район исследования: Балтийское море (а); Калининградский/Вислинский залив в юго-восточной Балтике (b); схема покрытия района исследования батиметрическими данными (с)

Fig. 1. Study area: Baltic Sea (a); Vistula Lagoon in the South-Eastern Baltic (b); scheme of covering the study area with bathymetric data (c)

Течения над отмелью [13] подчиняются режимным особенностям водообмена лагуны с морем, ориентированы двунаправленно (на заток морских вод и отток вод из залива) и характеризуются частой сменой знака. Между величиной кумулятивного водообмена залив – море и колебаниями уровня моря выявлена линейная связь (коэффициент регрессии $r = 0.84 \dots 0.98$).

В настоящее время потоки наносов через пролив изучены недостаточно, данные натурных измерений 1951–1965 гг. [3], на которых основаны современные оценки переноса взвеси [6, 8], технически уже устарели и требуют уточнений. Проблема баланса в седиментообмене должна решаться на основе накопления данных прямых измерений потоков взвешенного материала.

Цель работы – по геоморфологическим признакам выделить зоны осадконакопления и экспериментально на основе натурных данных изучить гидролитодинамические условия движения взвешенных наносов в районе пролива, обеспечивающего свободную связь Калининградского залива с Балтийским морем.

2. Методика исследований

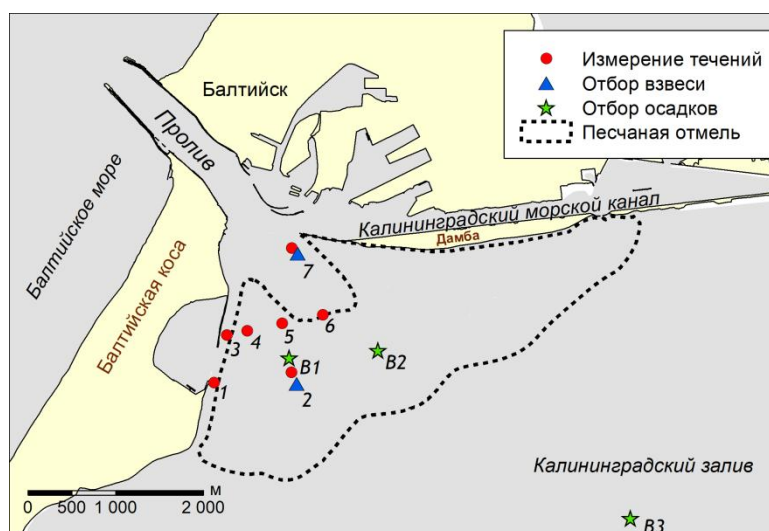
В работе реализована методика морфодинамических исследований, основанная на данных натурных измерений, отборе проб, обработке и анализе геолого-геоморфологической информации.

В основу **цифровой модели рельефа** легли батиметрические данные из различных источников: данные промеров однолучевым эхолотом на входе в Калининградский залив за 2012 г., данные многолучевых измерений на морском участке Калининградского морского канала (КМК) за 2011 г.

Батиметрические данные для остальной части Калининградского залива и Гданьского залива Балтийского моря были оцифрованы с использованием библиотеки открытой геоинформационной системы *SAS.Planet* (URL: www.sasgis.org) (рис. 1, *c*). Обработка и анализ батиметрических данных выполнялись в программных пакетах ГИС *Esri ArcGIS 10.0*. С использованием стандартных методов отображения поверхностей была подготовлена схема донного рельефа Балтийского пролива, затем по морфологическим признакам, аналогично обстановкам осадконакопления волнового эстуария [14–17], были выделены зоны осадконакопления.

Отбор донных отложений (слой 0.1–0.15 м) выполняли в трех точках (*B1*, *B2*, *B3* на рис. 2) одноканатным грейферным ковшом Ван Вина. **Отбор взвешенных наносов** проводили в соответствии с методическими разработками [18, 19]: на дне залива устанавливали жесткий пирамидальный каркас, на котором закрепляли кассеты с наносонакопителями двух типов (банка и стакан) на горизонтах 40, 100, 150, 200 см от дна и 40, 100, 150, 200 см от дна. Взвешенные наносы отбирали в двух точках в период с 28.06.2020 по 02.08.2020: в точке 2 в течении 35 сут, в точке 7 – 18 сут. В точке 2 устанавливали только наносонакопители горизонтального типа (банки), в точке 7 устанавливали оба типа наносонакопителей. Как стаканы, так и банки накапливают материал вне зависимости от направления потока – у банок боковые отверстия расположены по всему периметру, у стаканов полностью открыт верхний торец.

Гранулометрический состав отобранной взвеси и донного материала определяли по массовому содержанию частиц различной крупности, выраженному в процентах по отношению к массе сухой пробы осадков, взятой для анализа. Гранулометрический анализ выполняли ситовым (фракции более 0.04 мм) и водно-механическим (фракции менее 0.04 мм) методами [20] путем просеивания пробы песчаного осадка через набор сит аналитической просеивающей



Р и с . 2 . Схема измерений и отбора проб

F i g . 2 . Measurement and sampling map

машины AS 200. На основании результатов гранулометрического анализа в соответствии с классификацией Вентворта [21] были выделены следующие размеры фракций: крупнозернистый песок (1.0–0.5 мм), среднезернистый песок (0.5–0.25 мм), мелкозернистый песок (0.25–0.125 мм), тонкозернистый песок (0.125–0.063 мм), ил (0.063–0.04 мм), глина (менее 0.04 мм).

Измерения течений проводились в прилегающей к Балтийскому проливу акватории Калининградского/Вислинского залива в семи точках (точки 1–7 на рис. 2) автономными измерителями – инклинометрами. Они были разработаны в АО ИО РАН группой под руководством В. Т. Паки [22] для измерения донных течений в диапазоне скоростей 0.03–0.56 м/с (с максимальной относительной погрешностью 25 % для низких скоростей и 3–5 % для высоких скоростей). Измерения проводились в следующие периоды: зимняя постановка 24.12.2019 – 13.02.2020 (51 сут), весенняя постановка 17.03.2020 – 21.04.2020 (35 сут), летняя постановка 28.06.2020 – 02.08.2020 (35 сут).

Данные измерений были предварительно приведены к одинаковому шагу с дискретностью 1 измерение за 10 мин, затем векторные значения скоростей течений были переведены в скалярные: векторы скоростей течений (\vec{V}_a) были спроецированы на ось OX, ориентация которой определялась исходя из представления о двунаправленном (отток и заток) характере потока в близкой к проливу акватории [23, 24]. Между скоростями течений (\vec{V}) в разных точках измерений получены довольно высокие значения корреляций (см. табл. 1).

Условия переноса взвеси. Процесс движения наносов можно представить как последовательность трех условных фаз – взмучивание, перенос и осаждение (рис. 3). Условные пороги скорости течений, при которых возникают эти фазы, можно получить (табл. 2) из диаграммы Хюльстрема [25]. На основе полученных диапазонов скорости по данным измерений течений были выделены интервалы фаз взмучивания, переноса, осаждения для гранулометрических размерностей песков, ила и глины (по классификации Вентворта), при этом не учитывались те фазы потенциального осаждения и переноса, которые не были подкреплены предшествующими фазами взмучивания. Полученные интервалы движения взвешенных наносов были переведены в процентные доли от общей продолжительности измерений отдельно для оттоков и заток. Их сравнение позволяет интегрально оценить условия переноса взвеси в случае имеющихся в исследуемом районе возвратно-поступательных потоков.

Т а б л и ц а 1. Коэффициенты корреляции между скоростями течений (\vec{V})

T a b l e 1. Correlation coefficients between flow velocities (\vec{V})

Период измерений	Номера точек измерений	Коэффициент корреляции
24.12.19 – 13.02.20	1 / 2	0.99
17.03.20 – 21.04.20	5 / 6	0.99
28.06.20 – 02.08.20	1 / 2	0.94
28.06.20 – 02.08.20	3 / 4	0.92

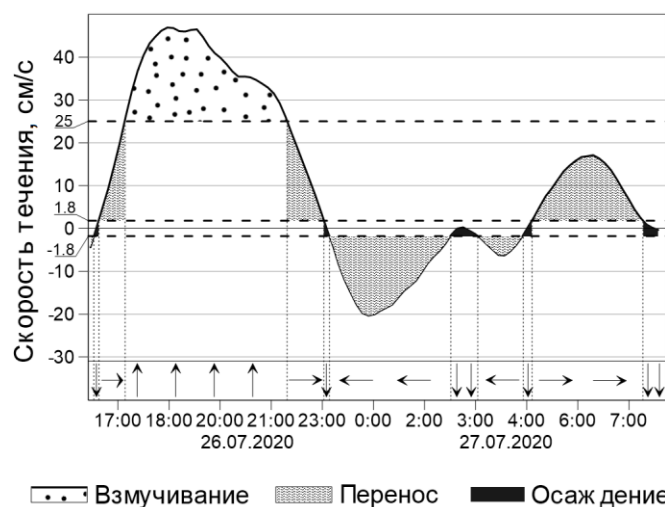


Рис. 3. Фазы скорости течений, при которых происходит потенциальное взмучивание, транспорт и осаждение частиц диапазона размерности 0.125–0.250 мм (мелкозернистый песок). Горизонтальные штриховые линии обозначают пороги для выбранного диапазона крупности. Положительная скорость потока означает приток воды в залив, отрицательная – отток. Стрелками схематично обозначены процессы осаждения (↓), транспорта (→;←) и взмучивания (↑)

Fig. 3. Phases of the flow velocity at which potential resuspension, transport and sedimentation occur for particles of the dimension range 0.125–0.250 mm (fine sand). Horizontal dotted lines indicate the thresholds of resuspension and sedimentation for the selected range of grain size. Positive flow rate means inflow of water into the lagoon, negative – outflow. The arrows along the horizontal axis schematically indicate the processes of sedimentation (↓), transport (→;←) and resuspension (↑)

Таблица 2. Пороги скорости взмучивания и осаждения по диаграмме Хюльстрема [25] для различных гранулометрических размерностей

Table 2. Thresholds of the rate of resuspension and sedimentation according to the Hjulstrøm diagram [25] for various granular dimensions

Тип взвеси (по Вентворту)	Размер частиц, мм	Порог взмучивания, см/с	Порог осаждения, см/с
Глина	0.040–0.063	25	0.5
Ил	0.063–0.125	20	0.9
Тонкозернистый песок	0.125–0.250	25	1.8
Мелкозернистый песок	0.250–0.500	30	3.6
Среднезернистый песок	0.500–1.000	45	6.6

3. Результаты и обсуждение

Седиментационная обстановка. Для характеристики гидролитодинамической системы пролива за основу была взята широко используемая за рубежом классификация обстановок осадконакопления, которая применяется для эстуариев [14–17].

В классификации седиментационных обстановок выделяется особый тип эстуариев – приливно-отливный эстуарий с преимущественно волновым режимом водообмена (волновой эстуарий) [14, 17]. Данный тип эстуариев формируется в системах река – лагуна – пролив – море, для него характерно наличие песчаного барьера между лагуной и морем, протоки сквозь барьер (пролив), затопленной приливной дельты со стороны лагуны, центральной части эстуария и внутренней речной дельты.

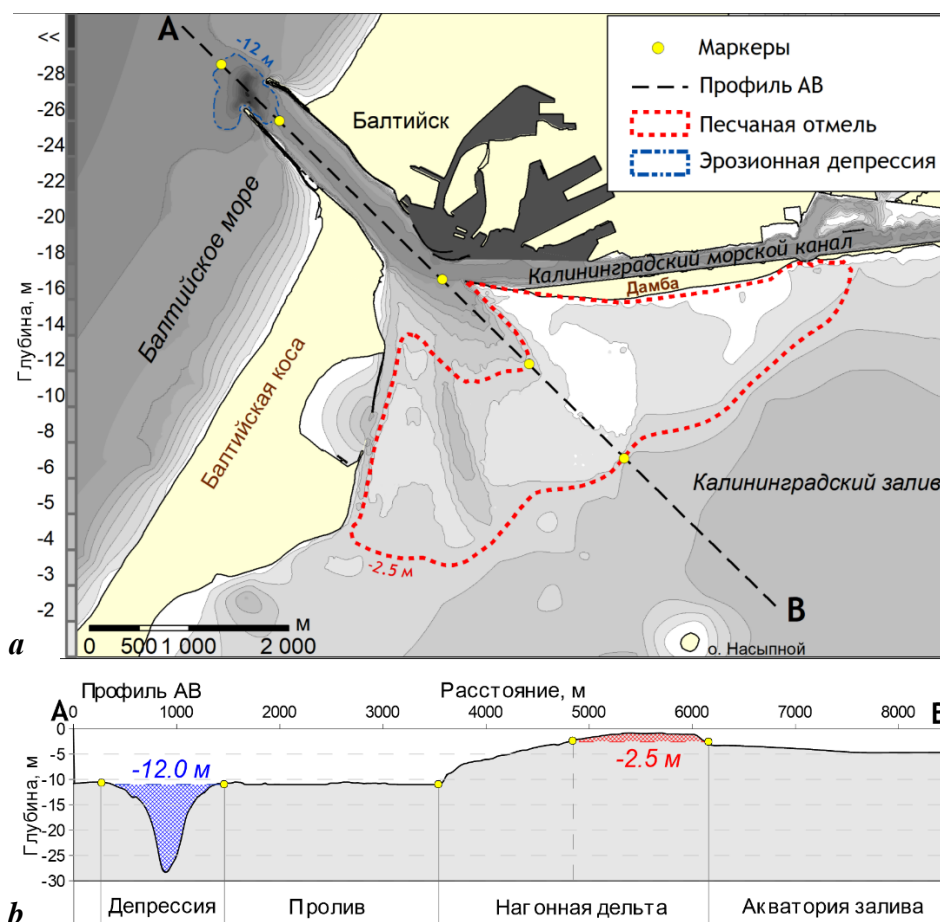
Калининградский залив – это бесприливный водоем лагунного типа, где смешиваются морские и пресные воды, поэтому по определению [14] его можно отнести к эстуарной системе. В Балтийском море приливно-отливные движения фактически отсутствуют, но очень развиты нагоны различного генезиса, обеспечивающие приток морских вод в залив и, соответственно, их отток при исчезновении нагонных условий [13]. Вместе с морскими водами в залив заносится морской песок, он откладывается в непосредственной близости от пролива и образует песчаную отмель [5, 11].

Аналогично концептуальной модели обстановок осадконакопления волнового эстуария [14], а также по аналогии с выделением «внутренней» дельты в [26] по морфологическим признакам в районе Балтийского пролива выделены следующие зоны (рис. 4):

- Балтийская коса и пролив – песчаный барьер и проход сквозь него;
- песчаная отмель на входе в залив – нагонная дельта (по аналогии с приливной);
- Калининградский залив – центральная часть эстуария.

Нагонная дельта – это отмель, которая сформирована в устье пролива (протоки) на стороне залива. Согласно [15, 26], такие аккумулятивные образования сложены главным образом осадками, которые перехватываются из вдольберегового (с морской стороны) потока наносов возвратно-поступательными движениями воды через пролив (в классическом варианте [14] они вызваны приливами/отливами, а в нашем случае – нагонами и сгонами). То есть в случае Калининградского залива нагонная дельта служит зоной конечного депонирования песчаных наносов при их движении из моря в залив.

Гранулометрический состав донных отложений. Отложения аккумулятивной области нагонной дельты (точка B2) содержат 51 % среднезернистых песков и 39 % мелкозернистых песков, а отложения центральной промоины (точка B1) – 84.8 % мелкозернистых песков (табл. 3). Доли крупнозернистых песков и тонкозернистых песков в точках B1 и B2 составляют по 5 %. Преобладание среднезернистых и мелкозернистых песков в отложениях аккумулятивной области нагонной дельты (точка B2) свидетельствует о том, что дельта преимущественно подпитывается этими фракциями. В глубине акватории залива, в точке B3, отложения содержат 50 % тонкозернистых, 29 % мелкозернистых, 10 % среднезернистых песков и 10 % ила.



Р и с . 4 . Схема морфологического строения донного рельефа в районе Балтийского пролива: вид в плане (а) и профиль АВ (b)

Fig . 4 . Diagram of the morphological structure of the bottom relief of the sedimentary system of the Baltic Strait: plan view (a) and profile AB view (b)

Вертикальное распределение взвешенного материала. Экспериментальный отбор взвешенного материала в точках 2 и 7 показал плавное уменьшение массы накопленного материала в зависимости от удаления от дна (табл. 4). Такое вертикальное распределение может быть интерполировано экспоненциальной кривой с достаточно высоким коэффициентом регрессии (r от 0.85 до 0.98) и небольшим стандартным отклонением (σ в пределах 0.3–0.6 г):

$$m = A \cdot e^{-H/H_0},$$

где A (г) и H_0 (см) – параметры регрессионной зависимости.

Для трех экспозиций (табл. 4) коэффициенты A и H_0 составляют 22.3 г и 370 см, 9.2 г и 670 см, 24.7 г и 230 см соответственно. Эти интерполяции характеризуются коэффициентами регрессии и значениями стандартного отклонения: 0.98 и 0.3 г, 0.85 и 0.3 г, 0.98 и 0.6 г соответственно.

Т а б л и ц а 3. Гранулометрический состав осадочного материала и водной взвеси в точках B1, B2, 2, 7 (%)

Table 3. Particle size distribution of sedimentary material and suspended sediments at points B1, B2, 2, 7 (%)

Точки пробо- отбора	Песок				Ил	Глина
	крупно- зернистый	средне- зернистый	мелко- зернистый	тонко- зернистый		
<i>Осадочный материал, отобранный ковшом Ван Вина</i>						
B1	1	4	85	10	0	0
B2	4	51	40	5	0	0
B3	0	19	29	50	10	0
<i>Водная взвесь, накопленная в банках</i>						
2	0	0	8	39	53	1
7	0	0	5	34	61	0
<i>Водная взвесь, накопленная в стаканах</i>						
7	0	1	16	44	40	0

Т а б л и ц а 4. Масса взвешенного материала по результатам экспериментального отбора взвешенных наносов ($m_{\text{меа}}$) и интерполяции ($m_{\text{инт}}$) в точках 2, 7

Table 4. The mass of the suspended material according to the results of experimental sampling ($m_{\text{меа}}$) and interpolation ($m_{\text{инт}}$) at points 2, 7

Горизонт, см	Метод пробоотбора					
	Банки *		Банки **		Стаканы **	
	$m_{\text{меа}}$, Г	$m_{\text{инт}}$, Г	$m_{\text{меа}}$, Г	$m_{\text{инт}}$, Г	$m_{\text{меа}}$, Г	$m_{\text{инт}}$, Г
40	20.0	20.0	9.0	8.7	21.5	20.7
60	18.5	19.0	–	8.4	–	19.0
80	18.5	18.0	–	8.2	–	17.4
100	–	17.0	7.5	7.9	15.0	15.9
120	16.0	16.1	–	7.7	–	14.6
150	–	14.9	7.5	7.6	13.0	12.8
170	14.0	14.1	–	7.1	–	11.7
200	–	13.0	7.0	6.8	10.5	10.2

* Пробы отобраны в точке 2.

** Пробы отобраны в точке 7

Примечание: тире означает, что пробы не отбирались.

Note: the dash means samples were not taken.

Несмотря на разницу в длительности экспозиции наносоуловителей в точках 2 и 7 (687 и 432 часа), наносонакопители горизонтального типа (банки) в обеих точках накопили примерно равное количество материала, что говорит о равномерном распределении потока взвешенного материала над всей площадью нагонной дельты.

Хотя характеристики интерполяционных кривых, описывающих вертикальное распределение взвешенного материала, на первый взгляд различаются, данные свидетельствуют о том, что в пределах водной толщи от горизонта 40 см до горизонта 2 м количество накопленного материала изменяется в пределах всего 25 % от максимума, находящегося на горизонте 40 см, что говорит о слабой стратификации потока по вертикали в пределах 2-метрового водного слоя над нагонной дельтой. А значит, возможна оценка переноса по данным, полученным всего на нескольких горизонтах.

Масса материала в наносонакопителях вертикального типа (стаканы) в точке 7 также плавно увеличивается от верхнего к нижним горизонтам. Характеристики вертикального распределения сходны с теми, что получены для масс, накопленных в ловушках для горизонтального потока. Разница лишь в том, что масса в вертикальных накопителях нарастает быстрее (на горизонтах 2 м и 40 см значения отличаются в два раза), чем в горизонтальных (отличие в 1.3–1.4 раза), что естественно, так как нижние накопители интегрируют в себя весь вертикальный поток, который нарастает от горизонта к горизонту.

Гранулометрический состав взвешенных наносов. По результатам гранулометрического анализа взвеси, отобранной в банки, т. е. из горизонтального потока, установлено, что в летних сезонных условиях над нагонной дельтой в 2-метровом слое от дна водный поток переносил 55–61 % илистого материала, 34–39 % тонкозернистого песка и 4–8 % мелкозернистого песка. Средне- и крупнозернистые пески в банках не обнаружены. Наносоуловители для вертикальных потоков (стаканы) накопили 40 % илистого материала, 44 % тонкозернистого песка, 16 % мелкозернистого песка и до 1 % среднезернистого песка.

Илистый материал, накопленный наносоуловителями, мог только выноситься из залива в море, так как в морских осадках его содержится мало [27]. Тонкозернистые пески широко распространены как в море, так и в заливе [7], поэтому их накопление в наносоуловителях (см. табл. 3) могло обеспечиваться как затоками из моря, так и оттоками из залива. Среднезернистый песок в наносоуловителях не обнаружен, что согласовывается с низкими скоростями водного потока в период пробоотбора.

Оценки времен переноса взвеси различных фракций. Летняя постановка наносонакопителей не дала достаточной информации для оценки условий переноса взвеси, поэтому оценка проводилась на основе данных измерений течений. Поскольку была обнаружена надежная связь между записями придонных скоростей в точках 1–7 (см. табл. 1), то для оценки условий переноса взвеси использовалась скорость водного потока, осредненная по данным измерений в этих точках.

На первом этапе были оценены суммарные временные интервалы последовательных фаз взмучивания и переноса взвеси разной крупности, при этом ситуации затoka и оттока анализировались отдельно, а полученные значения переведены в проценты (табл. 5). Результаты показали, что скоростные характеристики водного потока как при затоке, так и при оттоке были достаточны для переноса водной взвеси всех размерностей. Поэтому общий характер процесса движения взвешенных наносов через пролив можно выразить суммой и разностью длительностей потенциального переноса взвеси между затоками и оттоками (табл. 6).

Дольше всего (в процентах от всей длительности измерения) водным потоком сохранялись условия для переноса ила (32–54 %) и тонкозернистого песка (48–64 %), затем по мере увеличения крупности следует длительность переноса мелкозернистого песка (32–44 %), среднезернистого (17–34 %) и крупнозернистого (1–3 %) (табл. 6).

Если рассматривать движение наносов через пролив как возвратно-поступательное (или знакопеременное) движение песка из моря в залив и обратно в море, то разность длительности переноса взвеси при затоках и оттоках будет характеризовать баланс движения взвешенных наносов через Балтийский пролив в рассматриваемый период (табл. 6).

В зависимости от характеристик водного потока илистый и песчаный материал может переноситься как из залива в море, так из моря в залив, но возможность вовлечения в перенос уже вынесенного в море ила маловероятна, т. к. его сносит вдольбереговым потоком. Скоростные условия переноса (табл. 6) тонкозернистого песка были продолжительнее зимой и весной во время оттоков (на 8.1 и 0.2 %), а летом – во время заток (на 2.4 %). Возможность

Т а б л и ц а 5 . Длительность последовательных фаз взмучивания и переноса взвеси разной размерности по данным измерений скорости течений в зимний, весенний, летний периоды (% указан от общей длительности измерений)

T a b l e 5 . The duration of successive phases of resuspension and transfer of suspension of different grain size according to flow velocity in the winter, spring, summer measurement periods (% is indicated from the total duration of measurements)

Тип осадка	Зимний период (687 ч)				Весенний период (432 ч)				Летний период (432 ч)			
	Заток		Отток		Заток		Отток		Заток		Отток	
	ч	%	ч	%	ч	%	ч	%	ч	%	ч	%
Крупнозернистый песок	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Среднезернистый песок	0	0	0	0	8	1	11	2	10	1	0	0
Мелкозернистый песок	49	10	54	11	98	16	105	17	69	10	50	7
Тонкозернистый песок	101	21	91	19	140	23	121	20	115	17	102	15
Ил	130	27	131	27	167	28	215	36	175	25	158	23
Глина	101	21	91	19	134	22	189	31	116	17	104	15

Т а б л и ц а 6. Сумма и разность (в % от общей длительности измерений) длительности потенциального переноса взвеси различной крупности в промежутке времени между затоками и оттоками

Table 6. The sum and the difference (% of the total measurement duration) in the duration of the potential particle transport of various sizes in the time interval between inflows and outflows

Тип осадка	Зимний период		Весенний период		Летний период	
	Сумма	Разность	Сумма	Разность	Сумма	Разность
Крупнозернистый песок	0	0	0	0	0	0
Среднезернистый песок	40	2	54	-9.1	32	1.8
Мелкозернистый песок	54	-0.2	64	-8.1	48	2.4
Тонкозернистый песок	40	2	44	3.2	32	1.8
Ил	21	-0.9	34	-1.2	17	2.9
Глина	0	0	3.2	-0.6	1.4	1.4

переноса мелкозернистого песка дольше сохранялась зимой, весной и летом и исключительно только во время затоков (на 2, 3.2 и 1.8 % соответственно); среднезернистого песка – во время затоков зимой и весной (на 0.9 и 1.2 %), а летом – во время оттоков (на 2.9 %). Скоростные условия переноса крупнозернистого песка отмечены только весной и летом, при этом весной баланс оказывался в пользу оттоков (на 0.6 %), а летом – в пользу затоков (1.4 %).

Суммарно за все три периода измерений (73 сут) скоростные условия переноса илистого материала и тонкозернистого песка были продолжительнее во время оттоков (на 1.8 и 1.9 %), а мелкозернистого, среднезернистого и крупнозернистого песков во время затоков (на 2.3, 0.5 и 0.4 % соответственно) (рис. 5). Из этого следует, что во время измерений течений нагонная дельта потенциально аккумулировала материал. В большей степени она подпитывалась мелкозернистым песком, в меньшей – средне- и крупнозернистым песками.

4. Заключительные замечания. Проведенные измерения проиллюстрировали особенности процесса переноса наносов через пролив в отдельные периоды года. Натурные данные о накоплении взвеси в ловушках позволили сделать вывод о незначительной вертикальной стратификации горизонтальных потоков взвеси (на горизонтах 2 м и 40 см значения отличаются в 1.3–1.4 раза). В силу невозможности охватить все сезоны года прямыми наблюдениями, а также поскольку изучаемый район является транзитным, то оцененная в работе разница в длительности потенциального переноса взвеси (по измеренным скоростям потока) позволяет сделать предположения о его общем характере. Илистый материал транзитом выносится из залива в море. Для переноса тонкозернистого песка характерно возвратно-поступательное движение. Он может как выноситься, так и заноситься обратно в залив, при этом тонкозернистый песок не откладывается на нагонной дельте, которая

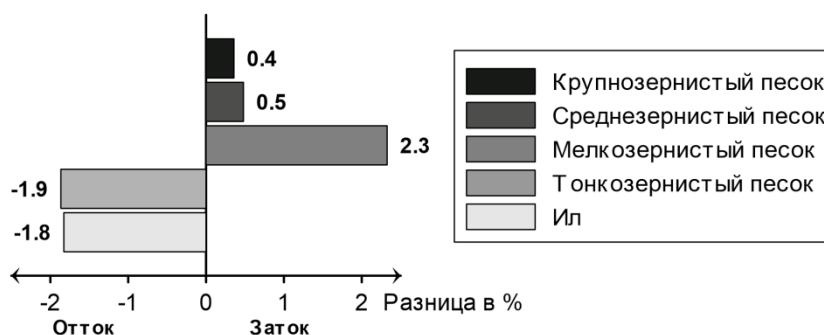


Рис. 5. Балансовая характеристика движения взвешенных наносов через Балтийский пролив: разница (%) общей длительности переноса взвеси между затоками и оттоками на протяжении трех периодов измерений (отрицательные значения – преобладание выноса, положительные – преобладание заноса). Длительность измерений – 73 сут (100 %)

Fig. 5. Balance characteristic of the movement of suspended sediments through the Strait of Baltiysk: the difference in the total duration (%) of the suspension transfer between the inflows and outflows during three measurement periods (negative values – predominance of the outflow, positive ones – predominance of the inflow). Measurement duration was 73 days (100 %)

является зоной конечного депонирования для более крупных фракций. Отложения нагонной дельты состоят в основном из мелкозернистого и среднезернистого песка с незначительным содержанием крупнозернистого, их источником служит вдольбереговой поток наносов (с мористой части Балтийской косы). Движение песка этих размерностей характеризуется как возвратно-поступательное, поэтому при высокой интенсивности водообмена отложения нагонной дельты могут вновь вовлекаться в перенос и выноситься обратно в море.

Низкое содержание мелкозернистого и среднезернистого песка в наносопуловителях соответствует тому, что в летний период измерений не были зафиксированы скорости водного потока, достаточные для массового переноса этого вида взвеси.

Нагонная дельта в Калининградском заливе, типичная для седиментационной обстановки в системе море – пролив – эстуарий, увеличивается, но современная скорость прироста так мала, что не объясняет текущие размеры дельты. Малые скорости ее развития в настоящее время могут быть связаны с регулярным дноуглублением в проливе – основной поток морских наносов извлекается в процессе дноуглубления еще на подступах к дельте, которая служит зоной конечного депонирования.

Придерживаясь указанной концептуальной модели обстановки осадконакопления сгонно-нагонного эстуария, можно предположить следующее: если нагонная дельта в дальнейшем будет активно развиваться, то по мере своего нарастания она все больше будет закупоривать проход из моря в залив, а поток донных наносов во все возрастающем объеме будет направляться в рукав КМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chubarenko B., Margoński P.* The Vistula lagoon // *Ecology of Baltic coastal waters.* Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. P. 167–195. doi:10.1007/978-3-540-73524-3_8
2. Возможные сценарии устойчивого развития / В. Кушевски [и др.] / Регион Калининградского/Вислинского залива: современное состояние и сценарий развития / Под ред. В. Кушевски [и др.]. Калининград, 2014. Глава 4.1. С. 187–195.
3. Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Н. Н. Лазаренко, А. П. Маевского. Л. : Гидрометеиздат, 1971. 279 с.
4. *Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В.* Входной участок Калининградского залива как природно-техническая система // *Российский журнал прикладной экологии.* 2022. № 1. С. 48–59. EDN OCGORH. doi:10.24852/2411-7374.2022.1.48.59
5. *Chechko V. A., Blazhchishin A. I.* Bottom sediments of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea // *Baltica.* 2002. Vol. 15. P. 13–22. URL: https://gamtostyrimai.lt/uploads/publications/docs/186_d0e78941be6818702231e507113c0959.pdf (date of access: 05.12.2022).
6. *Chubarenko, B. V., Chubarenko I. P.* New way of natural geomorphological evolution of the Vistula Lagoon due to crucial artificial influence // *Geology of the Gdansk Basin. Baltic Sea / E. M. Emelyanov (Ed.).* Kaliningrad : Yantamy Skaz, 2002. P. 372–375.
7. *Chechko V.* Spatial structure and evolution of bottom sediments in the Vistula Lagoon // *Transboundary waters and basins in the South-East Baltic / B. Chubarenko (Ed.).* Kaliningrad : Terra Baltica, 2008. P. 244–249. URL: <http://atlantic.ocean.ru/images/publ/Transboundar.pdf> (date of access: 05.12.2022).
8. *Chechko V., Chubarenko B.* Sediment balance of the Vistula Lagoon // *Managing risks to coastal regions and communities in a changing world : Proceedings of International Coastal Conference EMECS'11-SeaCoasts XXVI, Saint Petersburg, 22–27 August, 2016.* Saint Petersburg : RSHU, 2016. P. 164–173. EDN YNVCNG. doi:10.31519/conferencearticle_5b1b94303c55f9.63278465
9. *Chubarenko I. P., Chubarenko B. V.* General water dynamics of the Vistula Lagoon // *Environmental and Chemical Physics.* 2002. Vol. 24, iss. 4. P. 213–217.
10. *Szydłowski M., Kolerski T., Zima P.* Impact of the artificial strait in the Vistula Spit on the hydrodynamics of the Vistula Lagoon (Baltic Sea) // *Water.* 2019. Vol. 11, iss. 5. 990. <https://doi.org/10.3390/w11050990>
11. *Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В.* Морфометрические характеристики подводного песчаного бара на входе в Калининградский залив как индикаторы гидродинамической структуры водообмена залива с морем // *Комплексные исследования Мирового океана : материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Севастополь, 22–26 апреля 2019 г.* Севастополь : ФГБУН МГИ, 2019. С. 276–278. EDN RTMCMQ. URL: http://mhi-ras.ru/news/news_201904151055.html (дата обращения: 16.11.2022).
12. Динамика эрозионной депрессии на входе в Калининградский залив / Р. Б. Закиров [и др.] // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле.* 2018. Т. 26. С. 46–59. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.46>
13. *Chubarenko B., Zakirov R.* Water exchange of nontidal estuarine coastal Vistula lagoon with the Baltic Sea // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.* 2021. Vol. 147, iss. 4. 05021005. doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000633

14. *Reading H. G.* Sedimentary environments and facies. Oxford : Blackwell Scientific, 1978. 557 p.
15. *Hayes M. O.* Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime // Barrier islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico. New York : Academic Press, 1979. P. 1–28.
16. *FitzGerald D. M., Pendleton E.* Inlet formation and evolution of the sediment bypassing system: New Inlet, Cape Cod, Massachusetts // *Journal of Coastal Research*. 2002. Vol. 36, suppl. 1. P. 290–299. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.290>
17. *Барабошкин Е. Ю.* Практическая седиментология (терригенные коллектора). Томск : ТПУ, 2005. 153 с.
18. *Анциферов С. М., Косьян Р. Д.* Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М. : Наука, 1986. 224 с.
19. *Lund-Hansen L. C., Petersson M., Nurjaya W.* Vertical sediment fluxes and wave-induced sediment resuspension in a shallow-water coastal lagoon // *Estuaries*. 1999. Vol. 22, iss. 1. P. 39–46. <https://doi.org/10.2307/1352925>
20. *Буданова Т. Е., Озмидов О. Р., Озмидов И. О.* Современные методы изучения гранулометрического состава грунтов // *Инженерные изыскания*. 2013. № 8. С. 66–71. EDN RCDKDT.
21. *Wentworth C. K.* A scale of grade and class terms for clastic sediments // *The Journal of Geology*. 1922. Vol. 30, iss. 5. P. 377–392. URL: https://www.jstor.org/stable/30063207#metadata_info_tab_contents (date of access: 16.11.2022).
22. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений / В. Т. Пака [и др.] // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 2. С. 220–229. EDN: KB VIUB. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).13](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).13)
23. Придонные течения Калининградского залива / В. Ф. Дубравин [и др.] // *Экологические проблемы Калининградской области*. Калининград : КГУ, 1997. С. 90–95. URL: http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Kaliningrad/Uchebnye_e_pub/Kiti/KGU_pro_28.pdf (дата обращения: 16.11.2022).
24. *Соловьев А. Н.* О проявлениях сейшевых колебаний Балтийского моря в Калининградском заливе по данным автономного нефелометра // *Океанология*. 1999. Т. 39, №1. С. 158–160.
25. *Hjulström F.* Transportation of detritus by moving water // *Recent Marine Sediments. A Symposium*. Tulsa, Oklahoma, 1955. P. 5–31. (SEPM Special Publication ; no. 4). <https://doi.org/10.2110/pec.55.04.0005>
26. *Афанасьев В. В., Уба А. В., Левцкий А. И.* Миграция проливов и морское осадконакопление в лагунах // *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 3. С. 310–317. EDN CUJKVR.
27. О динамике береговой зоны моря в районе оградительных молов Калининградского морского канала / В. А. Чечко [и др.] // *Водные ресурсы*. 2008. Т. 35, № 6. С. 681–691. EDN JSXYB.

Поступила 29.08.2022 г.; одобрена после рецензирования 20.09.2022 г.; принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Об авторах:

Закиров Руслан Баядитович, старший инженер, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., 36), аспирант, **ORCID ID: 0000-0003-0125-374X, ResearcherID: AFB-2669-2022, kotruslan2@gmail.com**

Чубаренко Борис Валентинович, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией прибрежных систем, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., 36), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7988-1717**, **ResearcherID: I-6118-2016**, **Scopus Author ID: 6507102508**, *chuboris@mail.ru*

Чечко Владимир Андреевич, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., 36), кандидат геолого-минералогических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3030-1165**, **ResearcherID: AAF-9836-2020**, **Scopus Author ID: 15839153500**, *che-chko@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Закиров Руслан Баядитович – формулировка задачи, выполнение экспедиционных работ, обработка и анализ данных измерений, подготовка изображений и текста статьи

Чубаренко Борис Валентинович – формулировка проблемы, постановка и планирование экспедиционных работ и сбора дополнительной информации, стилистическое и содержательное редактирование текста статьи

Чечко Владимир Андреевич – курирование седиментационного направления

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.