

## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В КАЛИНИНГРАДСКОМ/ ВИСЛИНСКОМ ЗАЛИВЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПРИ НАЛИЧИИ СТАЦИОНАРНОЙ ПРИПРОЛИВНОЙ ПОЛЫНЬИ В 2021 г.

Е. В. Железова<sup>1,2</sup>, Б. В. Чубаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;*

<sup>2</sup> *Балтийский федеральный университет им. И. Канта,  
Россия, 236041, Калининград, ул. Александра Невского, 14,  
e-mail: ironkate@inbox.ru*

Представлены данные прямых измерений гидрологических условий в припроливной части Калининградского/Вислинского залива Балтийского моря при разных фазах водообмена при наличии ледяного покрова и полыньи. Используются данные экспедиционных работ зимой 2021 г. в сравнении с аналогичными данными экспедиционных работ по изучению морских затоков в летний период. Показано, что полынья формируется в зоне затока более теплых морских вод, и, тем самым, может служить индикатором глубины проникновения полнообъемных интрузий морских вод в акваторию лагуны, реализующихся в конкретных условиях уости пролива и наличия подводного бара.

**Ключевые слова:** полынья, ледяной покров, затоки морских вод, водообмен, лагуна, Вислинский залив, Балтийское море

### Введение

По данным (Zhelezova, Chubarenko, 2021) стационарные и устойчивые припроливные полыньи являются характерной чертой прибрежных лагун умеренного, субарктического и арктического климата, встречаясь в 115 из 246 или в 47 % замерзающих прибрежных лагун Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов Северного полушария, и подразделяются на два типа – проточный и приустьевой (с тремя подтипами – внутренняя полынья, внешняя и полынья – «окно»).

Одним из таких типичных объектов является припроливная внутренняя полынья, расположенная у Балтийского пролива в Калининградском/Вислинском заливе, прибрежной эстуарной лагуне Балтийского моря. Факт ее наличия упоминался в основных работах о заливе (Лазаренко, Маевский, 1971; Chubarenko, Margonski, 2008). Впервые ее характеристики подробно обсуждались только в (Zhelezova et al., 2018) на основе оптических спутниковых снимков за период с 2011 по 2021 гг. и радарных спутниковых снимков Юго-Восточной Балтики с 2013 по 2020 гг. вместе с сопутствующей гидрометеорологической информацией. Полынья была зафиксирована на снимках в восьми из указанных десяти зим. Ее среднегодовая площадь варьировалась от 4 до 14 км<sup>2</sup> (средняя – 9 км<sup>2</sup>). Полынья наблюдалась вне зависимости

от суровости зимы в широком диапазоне среднесуточных температур воздуха от  $-14^{\circ}\text{C}$  до  $+5^{\circ}\text{C}$ . Полынья присутствовала при колебаниях уровня моря от  $-0.37$  м до  $+0.45$  м. Область полыньи не реагировала на быстрые однодневные колебания температуры воздуха, но реагировала на изменения синоптического масштаба в 5–7 дней. Детальный анализ временных вариаций данных о площади полыньи и ветре показал, что площадь полыньи может увеличиваться или уменьшаться при любой скорости и любом направлении ветра. Прямое сравнение изменений площади полыньи с колебаниями уровня моря и ветром не выявило надежной связи по причине небольшого количества спутниковых снимков и, следовательно, несопоставимости редких рядов снимков полыньи (один раз в 2–4 суток) с регулярными рядами метеоданных (дискретность 6 часов).

Научной литературы по вопросам льдообразования в прибрежных лагунах очень немного. Специальный, но, похоже, временный интерес к замерзающим лагунам отмечался в Японии (проект SARES 1992-93, исследования Saroma-Resolute). В работе (Ushikoshi, 2001) рассматривались вопросы прочности морского льда на сжатие в лагуне Ноторо на острове Хоккайдо. Работы по анализу подледных условий лагуны Сарома-ко на острове Хоккайдо, начавшиеся с изучения проблемы развития микроводорослей, перешли в стадию систематического изучения гидрологических особенностей (Shirasawa et al., 2006) и условий замерзания (Kawamura et al., 2004). Обобщая полученные результаты, (Morimoto et al., 2010) пришел к выводу, что условия осадконакопления в замерзающих лагунах в основном контролируются горизонтальной адвекцией солоноватой воды, образующейся в результате смешивания морских и речных вод, стоком пресной воды и скоростью роста льда.

Куршский залив Балтийского моря рассматривался в (Idzelytė et al., 2019) с точки зрения ледовой фенологии на основе спутниковых данных и численного моделирования. В (Kozlov, 2020) обсуждалась ледовая обстановка в Куршском заливе на основе данных дистанционного зондирования и проводилась проверка результатов оценки толщины льда на основе радарных спутниковых снимков. Особенности зимней седиментационной обстановки Куршского залива приводились в (Кравцов, Емельянов, 2016). У (Szymczak, Szymtkiewicz, 2014) есть данные по осадконакоплению и ледяному покрову в лагуне Пуцк в южной части Балтийского моря. Выше уже упоминались работы по изучению гидрологических и седиментационных условий в Калининградском/Вислинском заливе Балтийского моря, когда он покрыт льдом (Чечко и др., 2011, 2016; Chubarenko et al., 2019), а также по припроливной полынье в заливе (Zhelezova, Chubarenko, 2021). В работе (Kolerski et al., 2019) представлены результаты моделирования процесса льдообразования в Калининградском/Вислинском заливе для оценки динамики льда и давления, создаваемого льдом на побережье искусственного острова, образовавшегося при строительстве канала через Вислинскую косу с польской стороны.

Таким образом, количество опубликованных работ по анализу физических аспектов (гидрологических и гидродинамических характеристик, осадконакопления) в условиях, когда лагуна покрыта льдом, совсем невелико.

Хотя механизмы льдообразования в лагунах те же, что и в любом другом солоноватоводном водоеме, но существуют свои особенности, такие как, например, образование устойчивых припроливных полыней, которые приурочены к входным проливам лагун (Zhelezova et al., 2018; Zhelezova, Chubarenko, 2021). Судя по местоположению, их образование и поддержание связано с процессом водообмена между лагуной и морской акваторией, которая остается свободной ото льда (Zhelezova et al., 2018).

В силу естественных ограничений по проведению экспедиционных работ в зимних условиях, и особенно вблизи границы вода–лед, до сих пор основными методами исследования были: использование спутниковых снимков (Zhelezova et al., 2018; Idzelytè et al., 2019; Kozlov, 2020) и численное моделирование (Shirasawa et al., 2006; Idzelytè et al., 2019; Kolerski et al., 2019). Натурные измерения (Ushikoshi, 2001; Shirasawa et al., 2006; Morimoto et al., 2010; Чечко и др., 2011, 2016; Chubarenko et al., 2019) проводились достаточно редко.

Целью настоящей работы является обсуждение данных прямых гидрологических измерений в районе припроливной полыни в Калининградском/Вислинском заливе Балтийского моря и соотнесение зафиксированных фаз водообмена с характеристиками полыни. Возможность детальных гидрологических съемок открылась только зимой 2021 г., когда период устойчивой холодной погоды позволил полынье сформироваться и существовать в течение месяца, а ветровые условия не препятствовали использованию малого плавсредства.

### Изучаемая акватория

Калининградский/Вислинский<sup>1</sup> залив, расположенный в юго-восточной части Балтийского моря (рисунок 1б), является прибрежной эстуарной лагуной (Chubarenko, Margonski, 2008) согласно геоморфологической классификации (Day et al., 1981; Davis, 1964). Он отделен от Балтийского моря аккумулятивной барьерной формой – Вислинской/Балтийской косой (рисунок 1б). Водообмен Балтийского моря с заливом осуществляется через единственный Балтийский пролив (ширина – 400 м, длина – 2 км и средняя глубина – 8.8 м) (Лазаренко, Маевский, 1971), который также является входом в судоходный Калининградский морской канал, имеющий в припроливной части глубины по фарватеру 9–12 м. Канал тянется на 43 км вдоль северного берега залива до порта Калининград (в устье реки Преголи) и отделен от акватории залива рядом искусственных островов-дамб, узкие проходы между которыми имеют ширину 20–50 м и глубину – 1–3 м (Лазаренко, Маевский, 1971). Канал был построен еще

---

<sup>1</sup> На официальных картах северная часть залива, принадлежащая России (56.2 % площади акватории), называется Калининградским заливом, южная (польская) часть – Вислинским заливом. Названия «Калининградский залив» и «Вислинский залив» обычно используются в случаях, когда речь идет о российской или о польской национальных частях залива, соответственно. Название через «слеш» введено в работе (Кушевки и др., 2014). Часто в научной литературе, следуя (Лазаренко, Маевский, 1971), весь залив назывался Вислинским.

в 1901 г., но это действующее гидротехническое сооружение, требующее постоянного технического обслуживания и дноуглубительных работ (Закиров и др., 2018). Единственный искусственный остров Насыпной расположен (рисунок 1в) в центральной, самой глубокой, части залива (Лазаренко, Маевский, 1971). Подводный «обратный» бар (рисунок 1в) находится внутри залива на расстоянии 3–3.5 км от входа. Он имеет минимальную глубину на гребне 1.5–2 м (окружающие глубины – 3–3.5 м) и образован крупнозернистым песком морского происхождения, транспортируемым внутрь лагуны во время нерегулярных затоков (Blazhishin, Chechko, 1997).

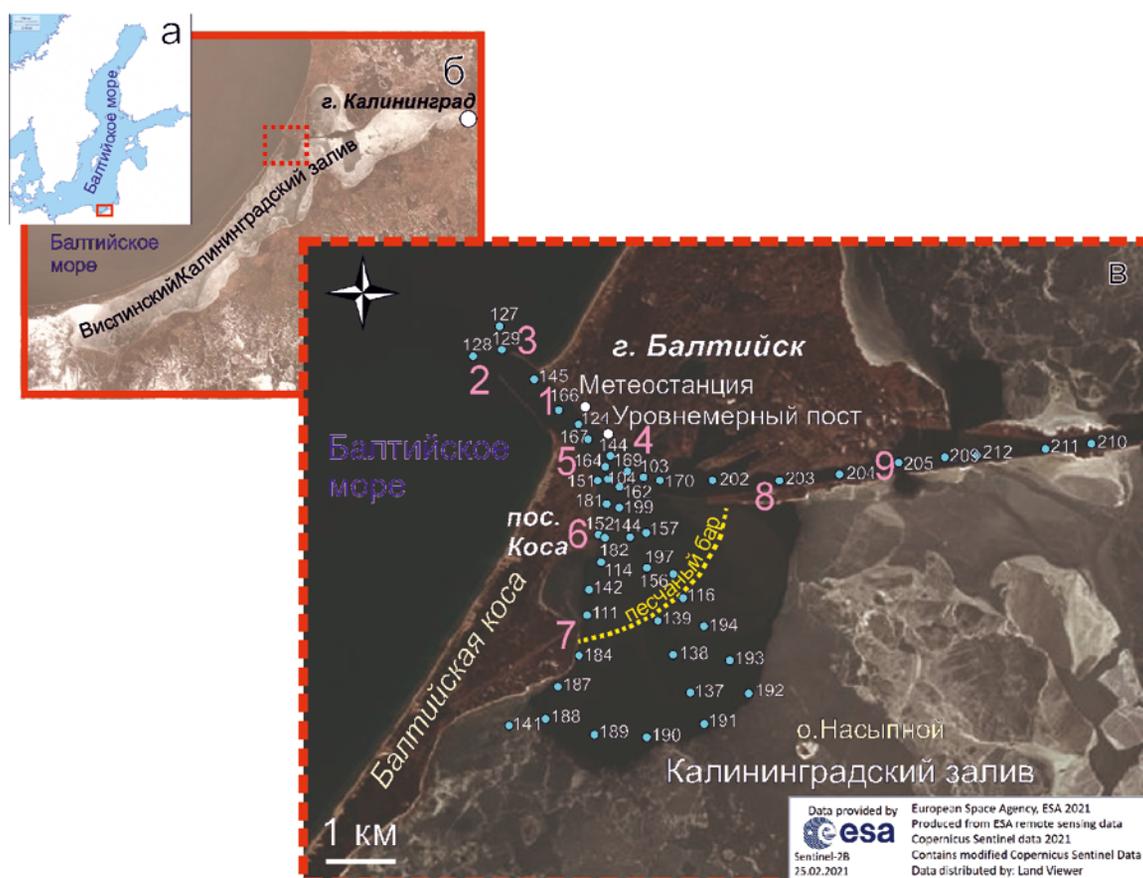


Рис. 1 – Балтийское море (а), Калининградский/Вислинский залив (б), карта станций вертикальных зондирований во входной зоне залива зимой 2021 г. на спутниковом снимке Sentinel – 2В от 25 февраля 2021 г. (в).

Цифрами отмечены: 1 – Балтийский пролив, 2 – южный входной мол, 3 – северный входной мол, 4 – паромная пристань в Балтийске, 5 – паромный причал в пос. Коса на Балтийской косе, 6 – северный мол гидрогавани, 7 – южный мол гидрогавани, 8 – первый остров дамбы Калининградского морского канала, 9 – Калининградский морской канал.

Голубыми точками показаны станции, трехзначными цифрами – их номера

Описание ледовых условий в заливе впервые дано в (Лазаренко, Маевский, 1971). Поскольку ледяной покров экранирует водную толщу от ветрового воздействия (Chubarenko et al., 2019), то основными динамическими факторами,

влияющими на водную толщу подо льдом, становятся водообмен с морем и сток рек. Подо льдом были установлены повышенная (по отношению к безледным условиям) вертикальная стратификация солености, а также то, что интрузия речной воды распространяется подо льдом гораздо дальше в лагуну, чем без льда, но только в верхнем слое (0.5–1.5 м). Колебания уровня воды в заливе являются основным динамическим фактором, влияющим на движение воды подо льдом повсюду в заливе.

Входная зона залива (Балтийский пролив и примыкающая к нему акватория Калининградского залива) характеризуется большими перепадами глубин (см. рисунки 4 и 5) (Лазаренко, Маевский, 1971; Закиров и др., 2018; Закиров, Чубаренко, 2022). Вдоль условной линии, идущей из Балтийского пролива на остров Насыпной, глубины изменяются от 12–15 м на фарватере до 5 м в проходе в залив между первым островом дамбы и берегом Балтийской косы. Далее глубины уменьшаются до 1.5–2 м при переходе через затопленную отмель («обратный» бар, (Blazchishin, Chechko, 1997)) и увеличиваются к средней части залива до 4–5 м.

Водообмен между Калининградским/Вислинским заливом и морской акваторией главным образом определяется колебаниями уровня воды в зоне их контакта, вызванными не приливами (их амплитуда очень мала в Балтийском море (Wryblewski, 2001; Медведев и др., 2013), а ветровыми нагонами и внутренними колебаниями уровня вод в Балтике (Chubarenko, Margonski, 2008). Подъем уровня приводит к ситуации притока морских вод в залив, а спад уровня – наоборот, к оттоку заливных вод (Chubarenko, Margonski, 2008; Chubarenko, Zakirov, 2021). По повторяемости события оттока превышают события притока примерно на 10 %, к тому же существует асимметрия в распределении длительности событий притока и оттока: продолжительность этих событий от 5–6 часов до 40–56 часов соответственно, приток длится в среднем около 15.5 часов, а отток чуть дольше – 19.5 часов (Chubarenko, Zakirov, 2021), что является естественным свойством эстуарной лагуны – транслировать в морскую акваторию приходящий в нее речной сток. По инструментальным измерениям (Chubarenko, Zakirov, 2021) была зафиксирована задержка между падением уровня моря и началом события оттока (в среднем 2.6 часа), и задержка между моментом подъема уровня моря и началом события притока (в 2 раза выше). Такая асимметрия объясняется тем, что залив легче переходит к естественному состоянию оттока, чем к установлению притока.

### Данные и методы

Измерения гидрофизических параметров вод в районе Балтийского пролива, соединяющего Калининградский/Вислинский залив с Балтийским морем, зимой 2020–2021 гг. проводились ручным способом, путем зондирования до дна (глубины 2–15 м) в течение 9 дней (квазиодновременные съемки в течение 1–3 часов 16–19 января, 25 января, 13–14 февраля, 18 февраля и 25 февраля 2021 г.) с малого

моторного плавсредства. Всего зондирования проводились на 47-ми фиксированных станциях (рисунок 1в), но только на тех из них, которые в данный день были свободны ото льда. Для измерений использовался CTD-зонд Idronaut OCEAN SEVEN 316 Plus (рисунок 2а), оснащенный сенсорами для измерения давления, температуры, электрической проводимости (в таблице 1 представлены технические параметры, заявленные производителем).



Рис. 2 – Измерения *in situ* в Калининградском заливе в январе–феврале 2021 г. (а) и граница полыньи и ледяного покрова 25 февраля 2021 г. (на горизонте – о. Насыпной) (б)

Таблица 1. Технические параметры измерительного CTD-зонда Idronaut OCEAN SEVEN 316 Plus

Параметры	Диапазон	Погрешность	Разрешение
Давление	0–1000 дбар	0.05 %	0.002 %
Температура	–3 – +50 °С	0.002 °С	0.0002 °С
Электропроводность	0–70 мСм/см	0.003 мСм/см	0.0003 мСм/см

Станции вертикального зондирования располагались на разрезах, которые шли по трем основным направлениям: начинались от точки между оконечностями входных молв на морской стороне Балтийского пролива, далее по его фарватеру, а затем разветвлялись на: I – вдоль Калининградского морского канала; II – к острову Насыпному в центр залива; III – по заливу на юг вдоль Балтийской косы. Движение маломерного плавсредства проводилось по визуальным ориентирам, координаты точек зондирования определялись по GPS. Их обилие и то, что профиль дна на разрезах (рисунки 4 и 5) может отличаться друг от друга, связано с тем, что часто движение по линии разреза преграждал ледяной покров, кромка которого, в зависимости от разных условий, меняла свое положение, и станции приходилось делать на некотором расстоянии от запланированных точек.

При первичной обработке удалялись ненужные данные (запись до опускания в воду, запись во время обратного хода зонда, ошибочные включения), затем в программе

Ocean Data View (version 5.0.0) строились разрезы с последующей графической корректировкой в CorelDRAW 2020.

Метеорологические данные (температура воздуха, скорость и направление ветра) на период экспедиционных работ были использованы для метеостанции Балтийска с сайта [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru), данные об уровне моря – с пункта наблюдений в Балтийском проливе (данные представлены в см относительно условного нуля).

Всего на период наблюдений было собрано 23 спутниковых снимка: Sentinel – 2A/B (ESA) из открытой базы данных Copernicus Open Access Hub, MODIS Aqua и Landsat – 8 (NASA) из открытой базы данных EOSDIS Worldview. В силу очевидной разности контрастов, использовался визуальный критерий выделения полыньи. Площадь полыньи оценивалась средствами ГИС после оцифровки спутниковых снимков.

## Результаты

В период с 10 января по 28 февраля 2021 г. было зафиксировано 3 периода сильного понижения среднесуточной температуры воздуха (до  $-14$  °C): с 16 по 19 января, с 6 по 12 февраля и с 15 по 20 февраля 2021 г. (рисунок 3). Первый лед на спутниковом снимке был зафиксирован 15 января, первая полынья – 11 февраля. Ветровая ситуация в период наблюдений представлена чередованием периодов ветров северных и южных румбов с максимальной силой в 11 м/с. Уровень моря (представлен относительно условного «0») изменялся в пределах  $\pm 40$  см и имел несколько периодов активного повышения и понижения, каждый из которых соответствовал активному притоку морских вод и оттоку вод из залива, согласно (Chubarenko, Zakirov, 2021).

Дни измерений пришлись на четыре случая притока морских вод в залив (16 января, 25 января, 13 февраля, 14 февраля 2021 г.), четыре ситуации оттока вод из залива в море (17 января, 18 января, 18 февраля, 25 февраля 2021 г.) и одну переходную ситуацию между притоком и оттоком (19 января 2021 г.). Даты гидрологических измерений STD-зондом затенены на рисунке 3.

Площадь полыньи (зеленые столбцы, правая ось на рисунке 3) оценивалась по имеющимся спутниковым снимкам, собранным для уточнения величины полыньи и состояния ледяного покрова: индексы S, L и M над подписями дат в нижней части рисунка указывают, соответственно, на тип спутника Sentinel–2, Landsat–8 или MODIS (снимок MODIS подтверждал факт наличия полыньи без измерения площади). Индексы «in» и «out» в верхней части рисунка обозначают ситуацию «притока» или «оттока», соответственно, которые оценивались по положению плавучего навигационного буя в Балтийском проливе.

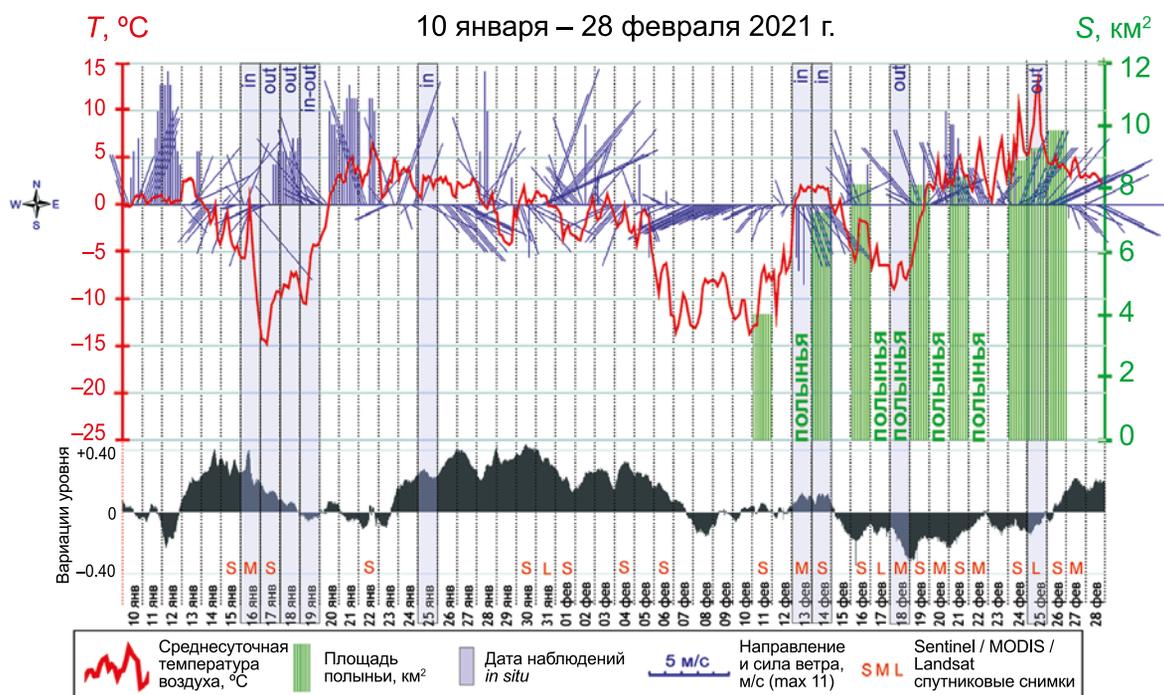


Рис. 3 – Изменения площади полыньи (зеленые столбики), температуры воздуха (красная кривая), уровня моря (теневая кривая), направления и скорости ветра (направленные отрезки) в заливе в период с 10 января по 28 февраля 2021 г. (Объяснение обозначений приводится в тексте)

На рисунке 4 представлены характерные пространственные распределения температуры и солёности на разрезах из Балтийского пролива в залив.

При оттоке вод из залива (рисунок 4а, б, в) у поверхности обнаружена распределенная заливная вода (около 0 °C и 6.0 PSU), а в придонной области на больших глубинах в судоходном канале просматривается «язык» более теплой (3.9 °C) и более солёной (7.4 PSU) морской воды, являющийся предвестником события притока. В этом случае кромка льда находилась ближе к Балтийскому проливу, чем располагается условная линия вершины подводного песчаного бара.

Во время событий притока (рисунок 4г, д, е) морская вода с солёностью 7.5 PSU и температурой 3.8 °C занимает всю толщу от дна до поверхности, и только у самой кромки льда, в приповерхностном слое, солёность и температура воды оказываются несколько сниженными. Таким образом, морская вода с температурой выше, чем у заливной воды, достигает непосредственно кромки льда. В данной ситуации притока морских вод кромка льда находилась позади условной линии вершины подводного песчаного бара, ближе к острову Насыпной и дальше от Балтийского пролива, чем в ситуации оттока заливных вод.

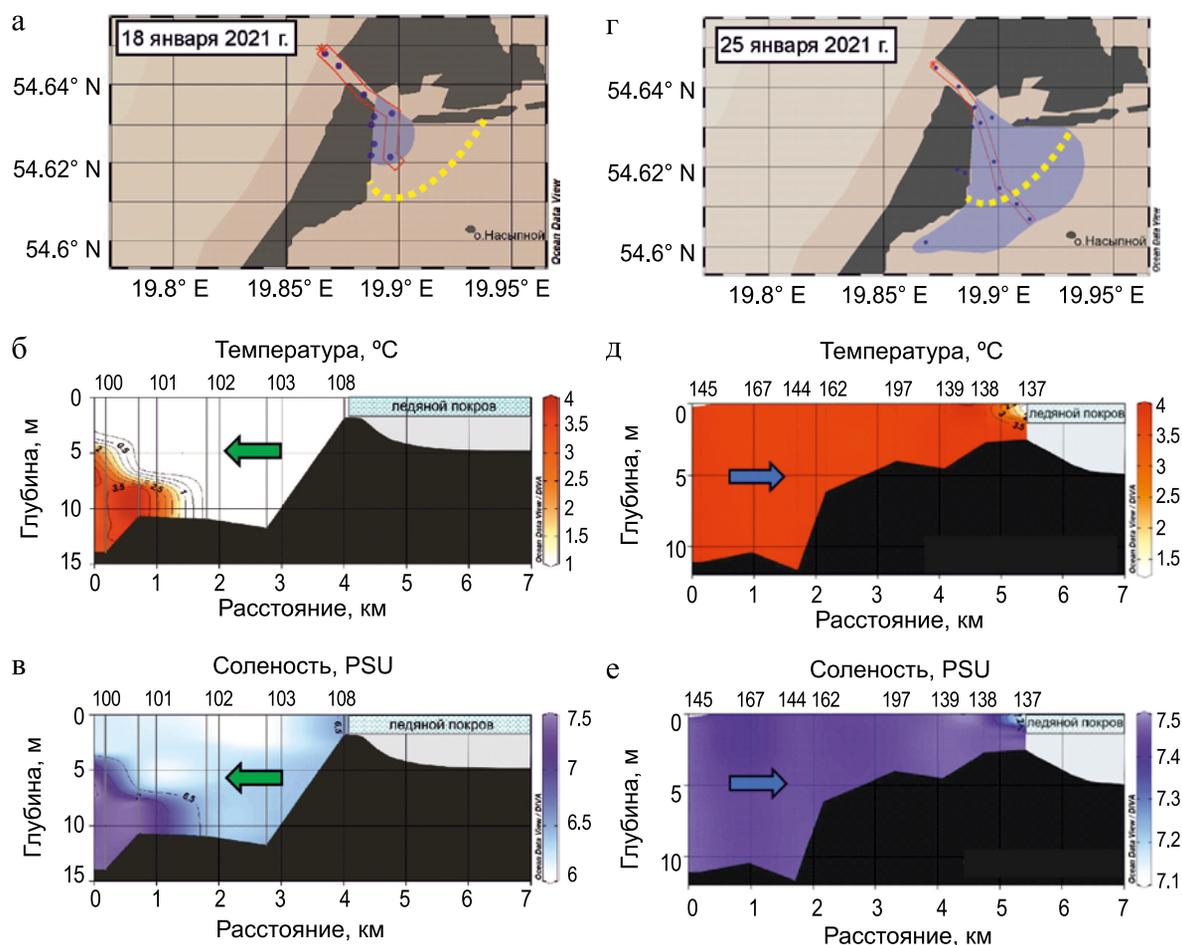


Рис. 4 – Гидрологические условия при наличии полыньи в случае оттока 18 января 2021 г. (а, б, в) и притока 25 января 2021 г. (г, д, е)

### Обсуждение

Калининградский/Вислинский залив является типичной эстуарной лагуной с преимущественно морским влиянием (Chubarenko et al., 2004). Водообмен с морской акваторией в таких лагунах является главным фактором, который обеспечивает горизонтальный градиент солености во всей акватории лагуны. Из-за того, что в залив постоянно заходит морская вода, которая смешивается с речной водой, поступающей с водосборного бассейна, в лагунах существует горизонтальная стратификация солености: более соленая вода – ближе к устьевому взморью, более пресная – у места впадения реки в лагуну (Kjerfve, 1994). Аналогично и во входной зоне залива – поступающая морская вода отличается максимальной соленостью, а вода центральной части залива имеет соленость примерно на одну промилле меньше.

Отток заливных вод (рисунок 4а, б, в), которые имеют температуру близкую к температуре замерзания ( $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), в принципе, способствует замерзанию льда и уменьшению площади полыньи. Если только этот отток не происходит с настолько большими скоростями, что вода просто не успевает замерзнуть.

Во время притока морских вод (рисунок 4г, д, е) притекающая морская вода заполняет всю толщу и омывает кромку льда, не давая ей замерзнуть далее, и может даже способствовать ее таянию, т.е. не только поддерживает площадь полыньи, но и, возможно, способствует ее увеличению.

Во время зимних работ 2021 г. гидрологические зондирования проводились только в открытой водной акватории, работать со льда не было возможности из-за его нестабильного состояния. Поэтому на разрезе, соответствующем ситуации притока морских вод (рисунок 4г, д, е), невозможно было получить данные – насколько далеко в залив распространялась интрузия морских вод. Для понимания ситуации использовались имеющиеся у авторов данные о летнем аналоге события притока (рисунок 5). Согласно этим данным (и другим имеющимся у авторов аналогичным измерениям), можно отчетливо видеть, что морская вода проникает дальше в залив в фазе полного затока, а потом опускается в центр котловины залива.

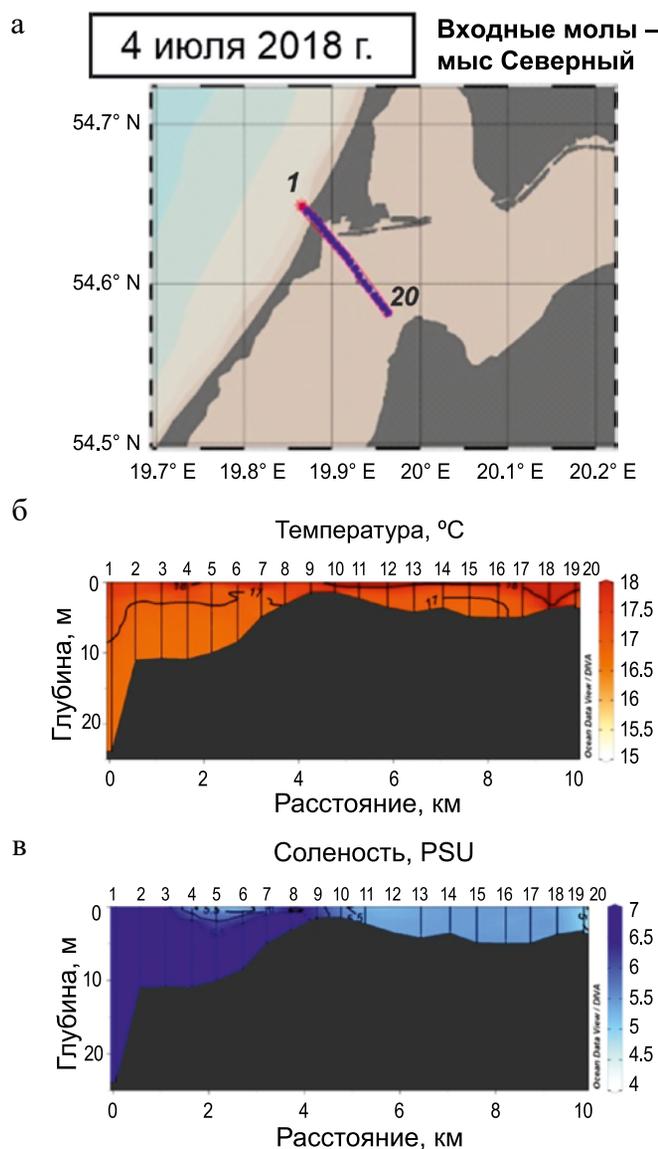


Рис. 5 – Гидрологические условия в случае притока (4 июля 2018 г.)

Обобщающая схема (рисунок 6) подготовлена по данным предшествующих летних экспедиционных работ по изучению процесса водообмена между морем и заливом. Она представляет собой поперечный разрез по линии от входных молов Балтийского пролива к мысу Северный полуострова Балъга. В первой фазе морская вода (во время своего проникновения в залив) занимает всю толщу, полнообъемно, а затем – во второй фазе – интенсивность полнообъемного затока падает (замедляется и сходит на нет скорость его продвижения вглубь залива), начинает формироваться придонная интрузия и вертикальная стратификация в районе границы затока. В третьей фазе происходит окончание затока: морская вода стекает по склону в центральную котловину лагуны, а граница области затока на поверхности стабилизируется и будет вскоре оттеснена назад развивающимся стоком более пресных заливных вод.

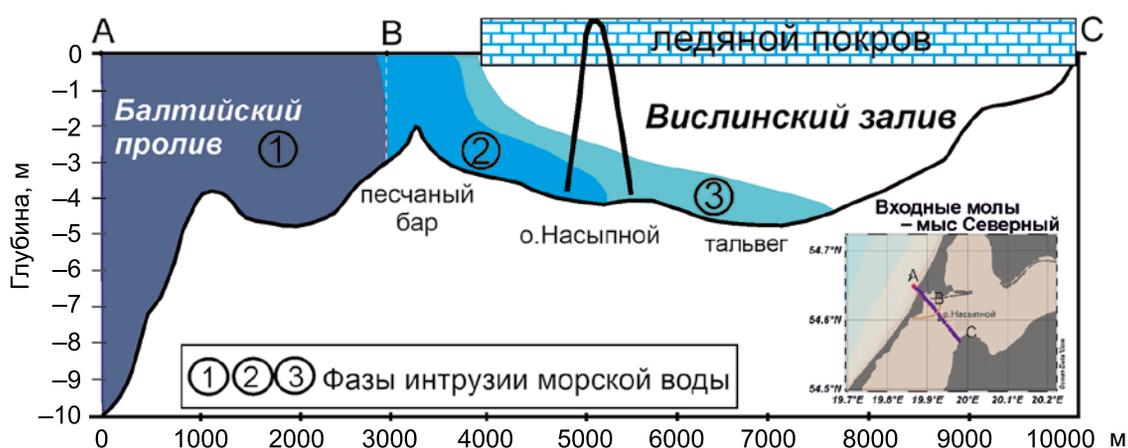


Рис. 6 – Схематическое изображение внедрения интрузий морской воды в Калининградский/Вислинский залив

Это основной механизм, который формирует вертикальную стратификацию в центральной части лагуны. Процесс проникновения балтийских вод происходит в периоды, когда уровень моря повышается. Он является случайным по своей природе, так как колебания уровня воды не происходят регулярно (отсутствуют приливы и отливы) и обусловлены колебаниями уровня воды в Балтийском море и местным ветром. Глубина проникновения соленой балтийской воды зависит от амплитуды колебаний уровня воды и продолжительности фазы ее подъема.

### Заключение

По гидрологическим измерениям в открытой акватории устойчивой припроливной полыньи, примыкающей к Балтийскому проливу Калининградского/Вислинского залива Балтийского моря, показано, что полынья формируется в зоне затока более теплых морских вод, и, тем самым, может служить индикатором глубины проникновения полнообъемных интрузий морских вод в акваторию лагуны, реализующихся в конкретных условиях узости пролива и наличия подводного бара.

**Благодарности.** Сбор данных выполнен за счет гранта РФФИ 19-35-90102, анализ и интерпретация данных – темы № FMWE-2021-0012 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Полевые работы были выполнены в рамках договора о сотрудничестве Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Атлантическое отделение) с БФУ им. И. Канта от 23.07.2019 №4/2019 (1358).

### Список литературы

1. *Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Сологуб С. П., Шушарин А. В.* Динамика эрозионной депрессии на входе в Калининградский залив // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. № 26. 2018. С. 46–59.
2. *Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В.* Входной участок Калининградского залива как природно-техническая система // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 1. С. 48–59. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.48.59>.
3. *Кравцов В. А., Емельянов Е. М.* Особенности зимней седиментационной обстановки в Куршском заливе Балтийского моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 242–257. <https://doi.org/10.7868/S003015741602012X>.
4. *Кушевски В., Федоров Г. М., Чубаренко Б. В., Гриценко В. А.* Регион Калининградского/ Вислинского залива: современное состояние и сценарий развития. БФУ им. И. Канта. Калининград, 2014. С. 216. ISBN 978-5-9971-0328-6.
5. *Лазаренко Н. Н., Маевский А. В.* Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Ленинград: Гидрометеиздат, 1971. С. 279.
6. *Медведев И. П., Рабинович А. Б., Куликов Е. А.* Приливные колебания в Балтийском море // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 596–609. <https://doi.org/10.7868/S0030157413050134>.
7. *Чечко В. А., Топчая В. Ю., Чубаренко Б. В., Пилипчук В. А.* Распределение и состав взвешенных веществ в воде и снежном покрове в Калининградском заливе // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 1. С. 37–46. <https://doi.org/10.7868/S0321059616010053>.
8. *Чечко В. А., Топчая В. Ю., Чубаренко Б. В., Баранов В. И., Козлова О. И., Красильников С. В.* Исследования условий осадкообразования в Вислинской лагуне (Балтийское море) в период ледостава // Геология морей и океанов. Материалы XIX Международ. науч. конф. (Школы) по морской геологии «Геология океанов и морей», Москва, 14–18 ноября, 2011. Москва, 2011. С. 101–105.
9. *Blazchishin A., Chechko V.* Sedimentation and resuspension rates in the Vistula Lagoon // The fifth marine geological conference. Abstracts. Vilnius, 1997. P. 17.
10. *Chubarenko B., Margonski P.* The Vistula Lagoon // Ecology of Baltic Coastal Waters. Edited by U. Schiewer. Ecological Studies (Analysis and Synthesis). Springer, Berlin, Heidelberg. Vol. 197. 2008. P. 167–195. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73524-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73524-3_8).
11. *Chubarenko B., Chechko V., Kileso A., Krek E., Topchaya V.* Hydrological and sedimentation conditions in a non-tidal lagoon during ice coverage – the example of Vistula Lagoon in the Baltic Sea // Estuar. Coast Shelf Sci., 2019. Vol. 216. P. 38–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.12.018>.
12. *Chubarenko B. V., Koutitonski V. G., Neves R., Umgieser G.* Modelling concept (Chapter 6) / I. E. Gonenc, J. Wolflin (eds.). In: Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Modelling for Sustainable Use and Developments. CRC Press, 2004. P. 231–306.

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 (4): 05021005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000633](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000633).
14. *Davis R. A.* A morphological approach to world shorelines // *Zeit. f. Geomorph.* 1964. Vol. 8. P. 27–42. <https://doi.org/10.1127/zfg/mortensen/8/1964/127>.
15. *Day J. H.* The Nature, Origin and Classification of Estuaries. Estuarine ecology with particular reference to southern Africa / J. H. Day (ed.) // Rotterdam: Balkema A. A., 1981. Vol. 411. P. 1–6. ISBN: 9789061912057. <https://doi.org/10.1002/IROH.19830680220>.
16. *Idzelytė R., Kozlov I. E., Umgiesser G.* Remote Sensing of Ice Phenology and Dynamics of Europe's Largest Coastal Lagoon (The Curonian Lagoon) // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. No. 17. P. 2059. <https://doi.org/10.3390/rs11172059>.
17. *Kawamura T., Shirasawa K., Ishikawa M., Takatsuka T., Daibou T., Lepparanta M.* On the Annual Variation of Characteristics of Snow and Ice in Lake Saroma // *Proceedings of the 17th IAHR International Symposium on Ice. Russia. St. Petersburg, 2004.* P. 212–220.
18. *Kjerfve B.* Coastal lagoon processes // Elsevier Science Publishers, Netherlands, 1994. P. 577. eBook ISBN: 9780080870984. <https://www.elsevier.com/books/coastal-lagoon-processes/kjerfve/978-0-444-88258-5>.
19. *Kolerski T., Zima P., Szydłowski M.* Mathematical modeling of ice thrusting on the shore of the Vistula lagoon (Baltic Sea) and the proposed artificial island // *Water*. 2019. Vol. 11. P. 2297. <https://doi.org/10.3390/w11112297>.
20. *Kozlov I. E., Krek E. V., Kostianoy A. G., Dailidienė I.* Remote sensing of ice conditions in the Southeastern Baltic Sea and in the Curonian Lagoon and validation of SAR-based ice thickness products // *Remote. Sens.* 2020. Vol. 12. P. 3754. <https://doi.org/10.3390/rs12223754>.
21. *Morimoto M., Kawanobe K., Abe O., Kawai T., Kawamura T., Shirasawa K.* Under-ice salinity and stable isotope distribution of Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, northern Japan // *Hydrological Processes*. 2010. Vol. 24. P. 04–916. <https://doi.org/10.1002/hyp.7532>.
22. *Shirasawa K., Lepparanta M., Kawamura T., Ishikawa M., Takatsuka T.* Measurements and modelling of the water-ice heat flux in natural waters // *Proceedings of the 18th IAHR International Symposium on Ice.* 2006.
23. *Szymczak E., Szmytkiewicz A.* Sediment deposition in the Puck Lagoon (Southern Baltic Sea, Poland) // *Baltica*. 2014. Vol. 27 (2) P. 105–118. <https://doi.org/10.5200/baltica.2014.27.20>.
24. *Ushikoshi J., Kamio Z., Matsushita H., Sakai M., Takeuchi T., Terashima T., Akagawa S., Nakazawa N., Saeki H.* Summary of five years' field test on mechanical properties. 2001.
25. *Wryblewski A.* Lunar nodal tide in the Baltic Sea // *Oceanology*. 2001. Vol. 43 (1). P. 99–112.
26. *Zhelezova E., Krek E., Chubarenko B.* Characteristics of the polynya in the Vistula lagoon of the Baltic Sea by remote sensing data // *Int. J. Rem. Sens.* 2018. Vol. 39:24. P. 9453–9464. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1524181>.
27. *Zhelezova E. V., Chubarenko B. V.* Recurring polynyas in the coastal lagoons of the Northern hemisphere // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021. Vol. 254. 107353. ISSN 0272-7714. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107353>.

Статья поступила в редакцию 21.06.2022, одобрена к печати 21.07.2022.

**Для цитирования:** Железова Е. В., Чубаренко Б. В. Гидрологические условия в Калининградском/Вислинском заливе Балтийского моря при наличии стационарной припроливной полыньи в 2021 г. // *Океанологические исследования*. 2022. Т. 50. № 2. С. 56–71. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(2\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).3).

## HYDROLOGICAL CONDITIONS IN THE VISTULA LAGOON OF THE BALTIC SEA IN THE PRESENCE OF A STATIONARY STRAIT POLYNIA IN 2021

E. V. Zhelezova<sup>1,2</sup>, B. V. Chubarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University,  
14, A. Nevskogo str., Kaliningrad, 236016, Russia,  
e-mail: [ironkate@inbox.ru](mailto:ironkate@inbox.ru)

The data of direct measurements of hydrological conditions in the pre-flood part of the Vistula lagoon of the Baltic Sea at different phases of water exchange in the presence of ice cover and polynya were presented. The data of the expedition work in the winter of 2021 were used in comparison with similar data of the expedition work on the study of sea currents in the summer. It was shown that the polynya was formed in the zone of the inflow of warmer sea water, and, thereby, can serve as an indicator of the depth of penetration of full-volume sea water intrusions into the lagoon area, realized in the specific conditions of the narrowness of the strait and the presence of an underwater bar.

**Keywords:** polynya, ice cover, sea water intrusions, water exchange, lagoon, Vistula lagoon, Baltic Sea

**Acknowledgements:** Data analysis and interpretation were conducted within the topic No. FMWE-2021-0012 of the State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. Data collection was funded by Russian Fund for Basic Researches (Russian Federation), project number 19-35-90102. The field work was carried out within the framework of the cooperation agreement between the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (Atlantic branch) and the Immanuel Kant Baltic Federal University dated 23.07.2019 No. 4/2019 (1358).

### References

1. Blazchishin, A. and V. Chechko, 1997: Sedimentation and resuspension rates in the Vistula Lagoon. *Abstracts of the Fifth marine geological conference*. Vilnius, 17.
2. Chechko, V. A., V. Yu. Topchaya, B. V. Chubarenko, and V. A. Pilipchuk, 2016: Raspređenje i sastav vzvешennyh veshchestv v vode i snezhnom pokrove v Kaliningradskom zalive. *Vodnye resursy*, **43** (1), 37–46, <https://doi.org/10.7868/S0321059616010053>.
3. Chechko, V. A., Yu. Topchaya, B. V. Chubarenko, V. I. Baranov, O. I. Kozlova, and S. V. Krasil'nikov, 2011: Issledovaniya uslovij osadkoobrazovaniya v Vislinskoj lagune (Baltijskoe more) v period ledostava. *Geologiya morej i okeanov. Materialy XIX Mezhdunarod. nauch. konf. (shkoly) po morskoy geologii «Geologiya okeanov i morej»*, Moscow, 14.10.2011–18.10.2011, 101–105.
4. Chubarenko, B. and P. Margonski, 2008: The Vistula Lagoon. *Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. U. Schiewer (ed.), Springer, Berlin, Heidelberg, **197**, 167–195, [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73524-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73524-3_8).

5. Chubarenko, B., V. Chechko, A. Kilesa, E. Krek, and V. Topchaya, 2019: Hydrological and sedimentation conditions in a non-tidal lagoon during ice coverage – the example of Vistula Lagoon in the Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **216**, 38–53, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.12.018>.
6. Chubarenko, B. V., V. G. Koutitonski, R. Neves, and G. Umgiesser, 2004: Modelling concept (Chapter 6). *Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Modelling for Sustainable Use and Developments*. I. E. Gonenc, J. Wolflin (eds.), CRC Press, 231–306.
7. Chubarenko, B. and R. Zakirov, 2021: Water Exchange of Nontidal Estuarine Coastal Vistula Lagoon with the Baltic Sea. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, **147** (4), 05021005, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000633](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000633).
8. Davis, R. A., 1964: A morphological approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **8**, 127–142, <https://doi.org/10.1127/zfg/mortensen/8/1964/127>.
9. Day, J. H., 1981: The Nature, Origin and Classification of Estuaries. *Estuarine ecology with particular reference to southern Africa*, Rotterdam: Balkema A. A., **411**, 1–6, ISBN: 9789061912057, <https://doi.org/10.1002/IROH.19830680220>.
10. Idzelytė, R., I. E. Kozlov, and G. Umgiesser, 2019: Remote Sensing of Ice Phenology and Dynamics of Europe’s Largest Coastal Lagoon (The Curonian Lagoon). *Remote Sensing*, **11** (17), 2059, <https://doi.org/10.3390/rs11172059>.
11. Kawamura, T., K. Shirasawa, M. Ishikawa, T. Takatsuka, T. Daibou, and M. Lepparanta, 2004: On the Annual Variation of Characteristics of Snow and Ice in Lake Saroma. *Proceedings of the 17th IAHR International Symposium on Ice*, Russia, St. Petersburg, 212–220.
12. Kjerfve, B., 1994: *Coastal lagoon processes*. Elsevier Science Publishers, Netherlands, 577 p., eBook ISBN: 9780080870984, <https://www.elsevier.com/books/coastal-lagoon-processes/kjerfv/e/978-0-444-88258-5>.
13. Kolerski, T., P. Zima, and M. Szydłowski, 2019: Mathematical modeling of ice thrusting on the shore of the Vistula lagoon (Baltic Sea) and the proposed artificial island. *Water*, **11**, 2297, <https://doi.org/10.3390/w11112297>.
14. Kozlov, I. E., E. V. Krek, A. G. Kostianoy, and I. Dailidienė, 2020: Remote sensing of ice conditions in the Southeastern Baltic Sea and in the Curonian Lagoon and validation of SAR-based ice thickness products. *Remote Sensing*, **12**, 3754, <https://doi.org/10.3390/rs12223754>.
15. Kravcov, V. A. and E. M. Emeliyanov, 2016: Osobennosti zimnej sedimentacionnoj obstanovki v Kurshskom zalive Baltijskogo moray. *Okeanology*, **56** (2), 242–257, <https://doi.org/10.7868/S003015741602012X>.
16. Kushevski, V., G. M. Fedorov, B. V. Chubarenko, and V. A. Gricenko, 2014: *Region Kaliningradskogo/Vislinskogo zaliva: sovremennoe sostoyanie i scenarij razvitiya*. BFU im. I. Kanta, Kaliningrad, 216 p., ISBN 978-5-9971-0328.
17. Lazarenko, N. N. and A. V. Maevskij, 1971: *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva*. Leningrad, Hidrometeoizdat, 279 p.
18. Medvedev, I. P., A. B. Rabinovich, and E. A. Kulikov, 2013: Prilivnye kolebaniya v Baltijskom more. *Okeanology*, **53** (5), 596–609, <https://doi.org/10.7868/S0030157413050134>.
19. Morimoto, M., K. Kawanobe, O. Abe, T. Kawai, T. Kawamura, and K. Shirasawa, 2010: Under-ice salinity and stable isotope distribution of Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, northern Japan. *Hydrological Processes*, **24**, 904–916, <https://doi.org/10.1002/hyp.7532>.
20. Shirasawa, K., M. Lepparanta, T. Kawamura, M. Ishikawa, and T. Takatsuka, 2006: Measurements and modelling of the water-ice heat flux in natural waters. *Proceedings of the 18th IAHR International Symposium on Ice*.
21. Szymczak, E. and A. Szmytkiewicz, 2014: Sediment deposition in the Puck Lagoon (Southern Baltic Sea, Poland). *Baltica*, **27** (2), 105–118, <https://doi.org/10.5200/baltica.2014.27.20>.

22. Ushikoshi, J., Z. Kamio, H. Matsushita, M. Sakai, T. Takeuchi, T. Terashima, S. Akagawa, N. Nakazawa, and H. Saeki, 2001: *Summary of five years' field test on mechanical properties*.
23. Wryblewski, A., 2001: Lunar nodal tide in the Baltic Sea. *Oceanology*, **43** (1), 99–112.
24. Zakirov, R. B., B. V. Chubarenko, S. P. Sologub, and A. V. Shusharin, 2018: Dinamika erozionnoj depressii na vhode v Kaliningradskij zaliv. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya: Nauki o Zemle*, **26**, 46–59.
25. Zakirov, R. B. and B. V. Chubarenko, 2022: Vhodnoj uchastok Kaliningradskogo zaliva kak prirodno-tekhnicheskaya Sistema. *Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii*, **1**, 48–59, <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.48.59>.
26. Zhelezova, E., E. Krek, and B. Chubarenko, 2018: Characteristics of the polynya in the Vistula lagoon of the Baltic Sea by remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, **39** (24), 9453–9464, <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1524181>.
27. Zhelezova, E. V. and B. V. Chubarenko, 2021: Recurring polynyas in the coastal lagoons of the Northern hemisphere. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **254**, 107353, ISSN: 0272-7714, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107353>.

Submitted 21.06.2022, accepted 21.07.2022.

**For citation:** Zhelezova, E. V. and B. V. Chubarenko, 2022: Hydrological conditions in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea in the presence of a stationary strait polynya in 2021. *Journal of oceanological research*, **50** (2), 56–71, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(2\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).3).