

*На правах рукописи*



**Железова Екатерина Владимировна**

**ПРИПРОЛИВНАЯ ПОЛЫНЯ В ПРИБРЕЖНЫХ ЛАГУНАХ  
КАК ИНДИКАТОР ВОДООБМЕНА С МОРСКОЙ АКВАТОРИЕЙ**

Специальность 1.6.17 – океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Калининград – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук,  
**Чубаренко Борис Валентинович**

**Официальные оппоненты:** **Огородов Станислав Анатольевич**, доктор географических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

**Козлов Игорь Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова»

Защита состоится «\_ \_» \_\_\_\_\_ 2022 г. в \_\_\_ ч \_\_\_ мин на заседании Диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук» по адресу: Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва, 117997

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «\_ \_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат физико-математических наук

Соловьев Дмитрий Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Объект исследования и актуальность темы.** Прибрежные лагуны по данным разных источников занимают от 10% [Бровко, 1990] до 13% [Berryhill et al., 1969], [Cromwell, 1971], [Barnes, 1980], [Cooper, 1994] длины береговой линии Мирового океана. Они являются либо отдельными береговыми объектами [Бровко, 1990], [Kjerfve, 1994], либо частями устьевых областей рек и находятся внутри речных дельт [Михайлов и др., 2009], [Михайлов, Горин, 2012]. Эстуарные лагуны (лагуны-эстуарии) являются зонами взаимодействия и смешения морских и речных вод и подвержены влиянию как морских, так и речных факторов, т.к. в них впадают реки [Михайлов и др., 2009], [Миньковская, 2018]. Вопросы водообмена лагуны с прилегающей морской акваторией [Chubarenko I., Chubarenko B., 2002], [Chubarenko, Zakirov, 2021] – ключевые при изучении любых прибрежных объектов, и имеют свои особенности в зимних условиях, одной из которых является феномен полыньи в прибрежной лагуне [Zhelezova, Chubarenko, 2021]. Географический термин «полынья», т.е. устойчивое пространство чистой воды среди неподвижных льдов или на их границе [Бушуев, 1974] был введен полярными исследователями 18 века (и есть упоминание в [Ломоносов, 1736]) для описания судоходного участка моря, покрытого льдом. Прибрежные и заприпайные полыньи широко распространены в Арктике (~61 полынья) и Антарктике (~ 37 полыней), они имеют большие размеры от 100-1000 м до 100 км [Smith et al., 1990], площадь от 10 до 100 000 км<sup>2</sup> [Barber et al., 2007], появляются в одном и том же месте и держатся, не замерзая по несколько месяцев. Согласно [Гаврило, Попов, 2011] полыньи можно подразделить по среднемесячной повторяемости: полынью называют стационарной, устойчивой или эпизодической, если повторяемость больше, чем 75% или 50- 74% или менее 50% соответственно. Исследованиям морского льда и полыней высоких широт посвящено очень много работ, в частности: [Зубов, 1938], [Захаров, 1966, 1996], [Бушуев, 1974], [Монин, Красицкий, 1985], [Untersteiner, 1986], [Smith et al., 1990], [Stringer, Groves, 1991], [Overland et al., 1995], [Comiso, Gordon, 1996], [Lepparanta, 1998], [Wadhams, 2000], [Barber et al., 2001], [Morales Maqueda et al., 2004], [Дикарев и др., 2004], [Морозов, Писарев, 2004], [Smith, Barbere 2007], [Barber, Massom, 2007], [Михайлов и др., 2008], [Dumont et al., 2009], [Hannah et al., 2009], [Спиридонов и др., 2011], [Гаврило, Попов, 2011], [Репина, Чечин, 2012], [Морозов, 2015], [Morozov

et al., 2019], [Marchenko et al., 2021]. В соответствии с [Morales Maqueda et al., 2004], по своему местоположению полыньи подразделяются на полыньи открытого моря (open water polynyas, «просвет» в ледяном 5 покрове далеко от берега) и шельфовые (shelf water polynyas, приурочены к материковой границе). Для первых характерен термический механизм образования и поддержания (в них лед тает), а для шельфовых – динамический (вновь и вновь образуемый лед выносится из зоны своего образования ветром и течениями). Также оба эти механизма могут присутствовать одновременно. Помимо крупных арктических и антарктических полыней существуют небольшие полыньи, которые находятся в прибрежных водоемах в одних и тех же фиксированных местах. Одним из таких типичных объектов является полынья, расположенная у Балтийского пролива в Вислинском заливе Балтийского моря, факт наличия которой упоминался в основных работах о заливе [Лазаренко, Маевский, 1971], [Chubarenko, Margonski, 2008], но ее характеристики и причины образования не рассматривались, что и послужило мотивацией для данной работы. Вислинский залив [Chubarenko, Margonski, 2008] является прибрежной эстуарной лагуной согласно геоморфологической классификации [Day et al., 1989], [Davis, 1964], он подвержен влиянию как морских, так и речных факторов и отделён от Балтийского моря аккумулятивной барьерной формой, перерезанной Балтийским проливом и ограничивающей его свободный водообмен с морем. Работ по ледовым условиям в лагунах [Shirasawa et al., 2002], [Kawamura, 2004], [Romanenko et al., 2012], [Varentsov et al., 2019], [Idzelytè et al., 2019], [Kolerski et al., 2019], [Kozlov, 2020] совсем немного. О полынях в лагунах если и есть упоминания, то только в популярно-туристических изданиях.

**Актуальность исследования** определяется появившейся сравнительно недавно возможностью использования общедоступных в сети Интернет и довольно регулярных по времени спутниковых снимков [Чалова, Скарятин, 2014], которые являются практически единственным источником регулярных данных о ледяном покрове [Даркин, 2009] и, соответственно, о полынях. Использование снимков позволяет собрать базовую информацию по большому количеству районов, которые ранее были попросту недоступны для одновременного исследования, и ввести в круг исследования новый объект (припроливную полынью в прибрежных лагунах), имеющий значение и для гидротермодинамики собственно самой лагуны, и прилегающей к ней морской

акватории, и для экологических и биологических приложений (хорошо известна роль полыней в арктических морях и озерах).

**Объектом исследования** являются припроливные полыньи в прибрежных лагунах Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов Северного полушария с детализацией для Вислинского залива Балтийского моря.

**Целью** является определение характеристик географической встречаемости полыней в лагунах Северного полушария, их типизация и оценки (на примере Вислинского залива Балтийского моря) возможности их использования в качестве маркера зоны водообмена между прибрежной лагуной и морской акваторией.

Достижение целей исследования предполагает решение следующих **задач**:

- Создать базу данных спутниковых снимков полыней в прибрежных лагунах Северного полушария (2013–2021 гг.); провести районирование прибрежных лагун по наличию полыней; предложить классификацию для лагунных полыней.
- Определить характеристики стационарной полыньи у Балтийского пролива в Вислинском заливе Балтийского моря (по спутниковым данным 2011–2021 гг.); выявить характерные особенности процесса формирования полыньи в ледяном покрове залива, оценить возможные действующие факторы.
- Провести гидрологические съемки в области смешения морских и лагунных вод в Вислинском заливе в зимний период (при наличии полыньи); сделать заключение о целесообразности использования стационарной припроливной полыньи как индикатора водообмена между прилегающей морской акваторией и заливом.

**Научная новизна работы.** Впервые в массовом порядке проанализированы зимние спутниковые снимки (2013–2021 гг.) прибрежных лагун, расположенных в умеренном, субарктическом и полярном климатах Северного полушария. Выделены основные типы стационарных и устойчивых полыней в лагунах – проточные, связанные с втекающими речными стоками, и припроливные, которые приурочены к проливам, соединяющим лагуны с морской акваторией, и подразделяющиеся на три подтипа (внутренний, внешний и полынья- «окно»). На примере Вислинского залива, одной из самых больших лагун Балтийского моря, проанализирована динамика за период 2011–2021 гг. стационарной припроливной внутренней полыньи. Установлено, что она выступает в роли пространственного индикатора зоны водообмена лагуны с морем, т.к. при действии всех остальных режимобразующих факторов (теплопотоки

за счет разности температур, влажности и ветра, трение ветра, поверхностное волнение, колебание уровня воды, разница в солености) заток более теплой морской воды в лагуну является главным действующим механизмом образования и поддержания полыньи.

В результате исследований сформулированы следующие **основные положения, выносимые на защиту:**

1. На основе спутниковых снимков за период с 2013 по 2021 гг. установлено, что стационарные и устойчивые припроливные полыньи являются характерной чертой замерзающих прибрежных лагун, расположенных в умеренном, субарктическом (бореальном) и полярном климатах Северного полушария: такие полыньи ежегодно присутствуют в 47% замерзающих лагун (из них - на побережьях Северного Ледовитого океана – 39%, Тихого океана – 63%, Атлантического океана - 33%).

2. Предложено подразделять стационарные и устойчивые полыньи в лагунах на два типа: припроливная полынья, приуроченная к проливу, соединяющему акватории лагуны и моря, с тремя подтипами – внутренняя (расположенная в акватории лагуны), внешняя (вне лагуны в замерзшей морской акватории) и полынья-«окно» (замкнутое образование в районе пролива между барьерными островами, при этом лагуна и прилежащая акватория моря покрыты льдом); проточная полынья, существующая внутри акватории лагуны и приуроченная к устью впадающей реки и образующаяся за счет активного потока речных вод.

3. По данным 10–летнего периода с 2011 по 2021 гг. выявлено, что существование припроливной полыньи в Вислинском заливе Балтийского моря имеет мультифакторную основу. Комбинация режимобразующих факторов (теплообмен между водой и воздухом, регулируемый температурой воздуха, влажностью и ветром, отжимное действие ветра, проникновение ветрового волнения из моря, скорости течений и колебания уровня) влияют на изменчивость размеров полыньи, но главным фактором является заток более теплых морских вод в лагуну.

4. По гидрологическим измерениям в Вислинском заливе Балтийского моря показано, что характеристики стационарной припроливной внутренней полыньи в прибрежной эстуарной лагуне определяются водообменом между морской акваторией и лагуну: полынья формируется в зоне залива более теплых морских вод, и тем самым служит индикатором глубины проникновения полнообъемных интрузий морских вод

в акваторию лагуны, реализующихся в конкретных условиях узости пролива и наличия подводного бара.

**Научная и практическая значимость работы.** Районирование прибрежных лагун Мирового океана Северного полушария по степени вероятности наличия в них полыней конкретных типов на основе созданной базы данных спутниковых снимков за период с 2013 по 2021 годы поможет исследователям сориентироваться при постановке дальнейших более детальных задач в изучении ледяного покрова прибрежных лагун, а также при оценке влияния глобального потепления на прибрежные экосистемы. Поскольку лагуны северных морей являются труднодоступными объектами, предварительный анализ зимних спутниковых снимков припроливной полыньи позволяет предварительно диагностировать зоны активного водообмена с морской акваторией, преимущественный тип и причины этого водообмена. Полученные сведения о припроливных полыньях вносят вклад в «лагунографию», а именно в развитие теоретической модели водообмена прибрежной лагуны и морской акватории.

8 Исследование полыньи около Балтийского пролива в Вислинском заливе имеет непосредственно практическое значение, так как наличие полыньи в данном конкретном месте позволяет зимой иметь транспортную связь (автомобильно-пассажирский паром) между поселком Коса (более 1 тыс. жителей, расположен на Балтийской косе) и городом Балтийск. Другой важный аспект заключается в том, что внутренняя гавань порта Балтийск, которая предназначена для штормового отстоя малотоннажных судов, остается свободной ото льда из-за существования полыньи.

**Достоверность научных результатов и выводов работы.** Для получения натуральных данных использовалось современное измерительное оборудование (СТД-зонд Idronaut OCEAN SEVEN 316 Plus); проведено сравнение характеристик зим 2011-2021 гг. с имеющимися историческими данными [Лазаренко, Маевский 1971]. Метеорологические архивные данные взяты с сайта [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru), разработанного и сопровождающегося компанией (ООО) "Расписание Погоды", Санкт-Петербург, Россия, с 2004 года; портала Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане <http://portal.esimo.ru>. Анализировались радарные спутниковые снимки Юго-Восточной Балтики, полученные в рамках оперативного спутникового мониторинга нефтяного месторождения Кравцовское (Д-6), эксплуатируемого ООО "ЛУКОЙЛ-КМН". Дополнительно использовались оптические

снимки Sentinel-2A/B (ESA) из открытой базы данных Copernicus Open Access Hub, MODIS Terra/Aqua и Landsat 8 (NASA) в базе EOSDIS Worldview. В силу очевидной разности контрастов, использовался визуальный критерий выделения полыньи.

Определенной гарантией **достоверности научных результатов и выводов работы** является их публикация в рецензируемых зарубежных и российских журналах и презентациях на научных конференциях.

**Личный вклад автора** заключается в том, что Е.В. Железова выполняла сбор и подготовку исходной информации, формирование базы спутниковых данных прибрежных лагун за зимние периоды 2011-2021 гг., разработку методики, расчёты, графические построения, картографирование; осуществляла анализ и обобщение результатов; принимала участие в экспедиционных работах в летний и зимний периоды 2021 г. в Вислинском заливе Балтийского моря; с соавторами проводила подготовку полученных результатов к опубликованию в зарубежных и российских журналах, а также представляла их на семинарах и научных конференциях.

**Апробация результатов.** Главные результаты и основные положения работы были представлены на заседаниях Ученого совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (18 февраля и 17 июня 2022 г.), а также на 9 российских и международных конференциях и школах в период 2017 – 2021 гг.: Baltic from Space Workshop - 2017, 3d Students Workshop on Ecology and Optics of Coastal Zones - 2017, 8th EARSel Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone – 2017, 8th European Coastal Lagoon Symposium – 2018, международная научно-практическая конференция «Проблемы регионального развития в начале XXI века - 2018», 9th EUROLAG International Conference on Coastal Lagoons and Transitional Environments – 2020, V Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана – 2020», 3rd Baltic Earth Conference «Earth system changes and Baltic Sea coasts – 2020», на семинарах лаборатории прибрежных систем АО ИО РАН.

**Основные публикации по теме диссертационной работы.** Основные результаты полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. Всего опубликовано шесть научных работы, в том числе две статьи в рецензируемых международных журналах и одна в рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК, и три тезиса докладов на международных и российских научных конференциях.



**Структура и объём диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 159 страницах, включает 118 рисунков, 17 таблиц. Список использованных материалов включает 135 источников, в том числе 86 на иностранных языках.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. Б.В. Чубаренко за предложенную проблему, существенную помощь при подготовке публикаций и рукописи, поддержку идей, советы и конструктивную критику, кроме того, коллективу лаборатории прибрежных систем и Е.В. Крек (Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН) за плодотворное сотрудничество. Отдельное спасибо семье за придание уверенности в написании работы.

Сбор спутниковых снимков и их обработка проводились в рамках тем №№ 0149-2018- 0012, 0149-2019-0013, 0128-2021-0012 государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Анализ, подготовка публикаций и участие в экспедиционных исследованиях частично поддерживались в рамках проекта «Аспиранты» РФФИ № 19-35- 90102.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлена общая характеристика работы, включающая обоснование актуальности темы, объект и основную цель исследования, поставленные задачи, основные положения, выносимые на защиту, научную и практическую значимость, личный вклад автора и апробацию результатов исследования.

**Глава 1 «ПРИРОДНЫЕ ВОДОЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА»** содержит основные сведения о ледяном покрове и полыньях. В **разделе 1.1** дан обзор литературы о механизмах образовании льда в пресной и соленой воде, об их классификации по происхождению, возрасту и динамике, описываются характеристики пресноводного льда и этапы его формирования в морях, реках, озерах и лагунах. В **разделе 1.2** приводятся сведения о таком природном феномене как полыньи, об их географическом распространении и имеющихся подходах к классификации. В **разделе 1.3** представлены сведения об объекте исследования и терминологии. В **разделе 1.4** содержатся элементарные сведения о лагунах, их

геоморфологической классификации и типологии форм по способу водообмену с морем (океаном), морфометрические характеристики, обсуждается вопрос водообмена в лагунах. В **разделе 1.5** говорится о влиянии солености на возможность образования полыней в лагунах и почему в дальнейшем фактор солености в работе рассматриваться не будет. В **разделе 1.6** изложены выводы по Главе 1.

В **Главе 2 «ЛАГУННЫЕ ПОЛЫНИ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ»** приводится развернутый ответ на вопрос: являются ли полыни единичными случаями или это типичный эффект для замерзающих лагун морей Северного полушария бассейнов Атлантического, Северного Ледовитого и Тихого океанов? В **разделе 2.1** приводятся характеристики использованных спутниковых снимков, охватывающих зимние периоды с 2011 по 2022 гг., описывается технология анализа. Из общего количества 281 потенциально благоприятных для льдообразования лагун 246 оказались замерзающими. Введен критерий повторяемости: если полынья встречалась на снимках в течение 6 из 8 лет и чаще, она считалась *стационарной*, если 4 года из 8 лет и чаще – *устойчивой*. *Эпизодические*, которые были зафиксированы менее 4 лет, в работе не учитывались. Таким образом, 115 лагун были признаны содержащими стационарные и устойчивые полыни (приводится их перечень). В **разделе 2.2** представлены статистические характеристики площадей полыней в лагунах. В **разделе 2.3** представлено географическое районирование прибрежных районов с потенциальными для льдообразования лагунами в Северном полушарии (рис. 1). Стационарные и устойчивые припроливные полыни является характерной чертой замерзающих прибрежных лагун умеренной, субарктической (бореальной) и полярной климатических зон Северного полушария. Такие полыни ежегодно присутствуют в 47% замерзающих лагун Мирового океана в Северном полушарии (на побережьях Северного Ледовитого океана – 39%, Тихого океана – 63%, Атлантического океана – 33%).

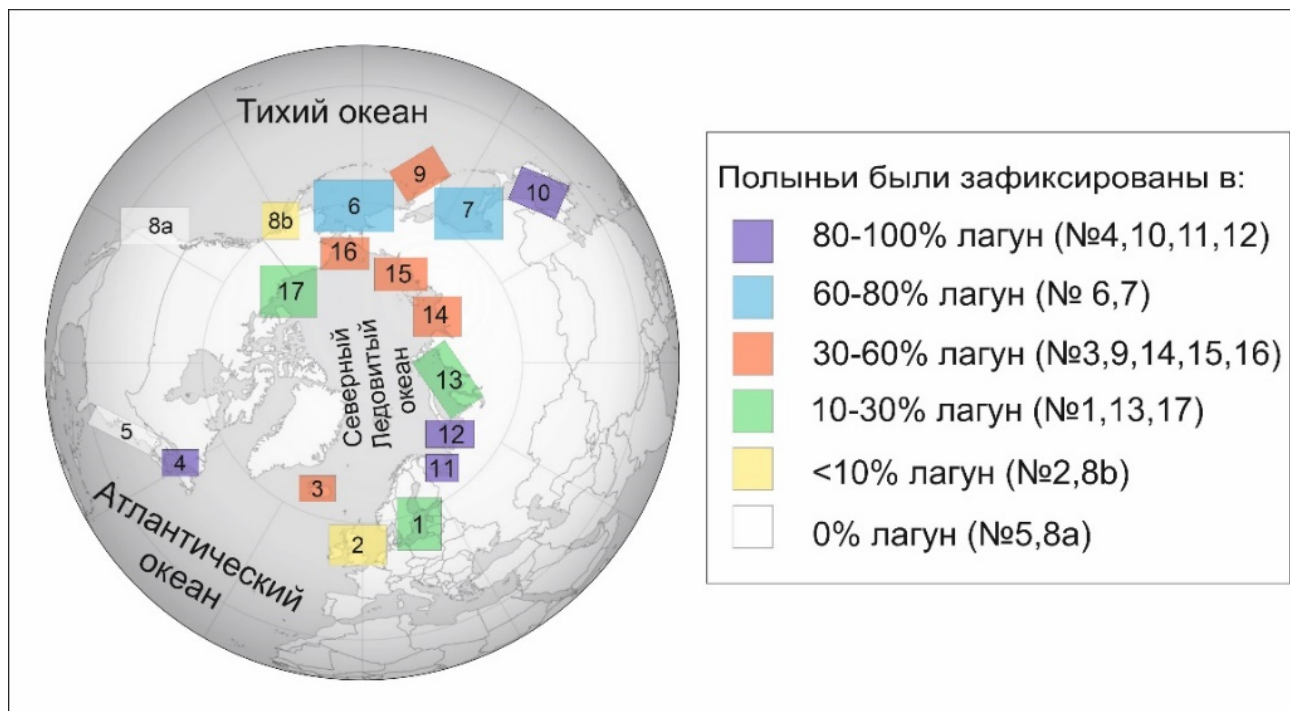


Рисунок 1 - Географическое положение морей и океанов в Северном полушарии, в прибрежных районах которых существуют лагуны с потенциально возможным льдообразованием (281 лагуна). **Атлантический океан:** 1 - Балтийское море, 2 - Северное и Ирландское моря, 3 - собственно Атлантический океан (побережье Исландии), 4 - Залив Святого Лаврентия, 5 - собственно Атлантический океан (побережье США); **Тихий океан:** 6 - Берингово море, 7 - Охотское море, 8 – собственно Тихий океан (8a южный и 8b северный прибрежные районы США), 9 - собственно Тихий океан (побережье Японии и России), 10 – Японское море (побережье России); **Северный Ледовитый океан:** 11 - Белое море, 12 - Баренцево море, 13 - Карское море, 14 - Море Лаптевых, 15 - Восточно-Сибирское море, 16 - Чукотское море, 17 - Море Бофорта

В разделе 2.4 представлена типизация полыней по признаку их локализации, сделанная на основании спутниковых снимков за период с 2011 по 2021 гг. (рис. 2). Стационарные и устойчивые полыньи в лагунах можно подразделить на два типа: *припроливная полынья*, приуроченная к проливу, соединяющему акватории лагуны и моря, с тремя подтипами – *внутренняя* (расположенная в акватории лагуны); *внешняя* (вне лагуны в замерзшей морской акватории); *полынья-«окно»* (замкнутое образование в районе пролива между барьерными островами, при этом как лагуна, так и прилежащая акватория моря покрыты льдом); *проточная полынья*, существующая внутри акватории лагуны и приуроченная к устью впадающей реки, образующаяся за счет активного потока речных вод.

В 115 лагунах умеренной, субарктической (бореальной) и полярной климатических зон Северного полушария в 75% случаев встречается припроливная внутренняя, 19% - полынья-«окно» и в 6% - припроливная внешняя полынья.

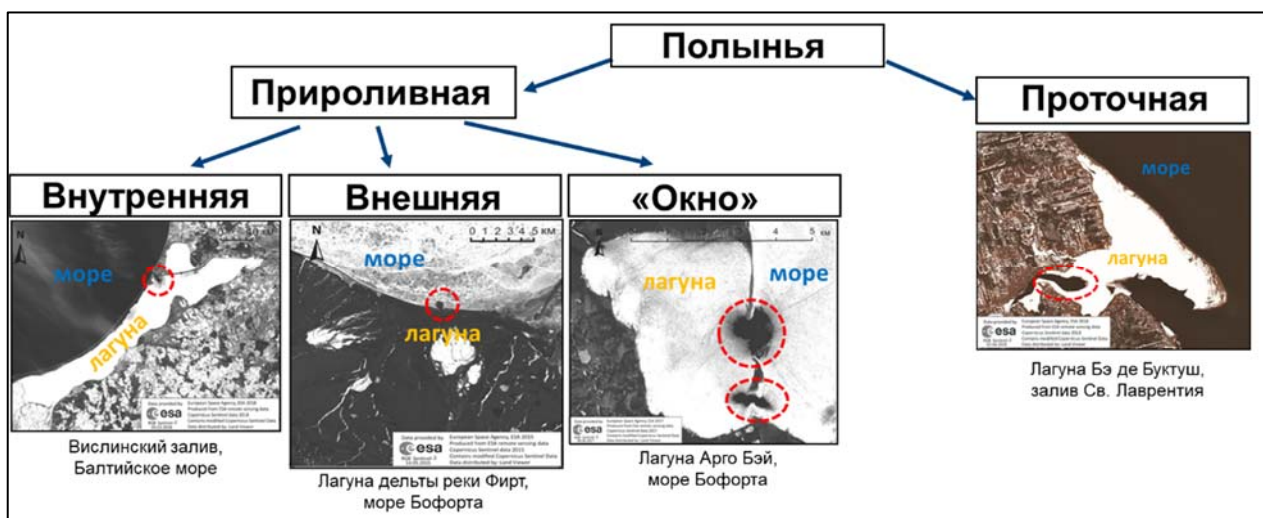


Рисунок 2 - Типы и подтипы повторяющихся (стационарных и устойчивых) полыней в прибрежных лагунах Северного полушария

В разделе 2.5 приводятся гипотезы о механизмах возникновения полыньи с примерами. Все типы повторяющихся полыней являются проявлениями различных механизмов (тепловых или механических или и то, и другое), которые формируют и поддерживают полынью в ледяном покрове. Это может быть речной сток для проточной и внешней припроливной типов полыней, или приток морской воды и повышение уровня воды для внутренней припроливной полыньи, или знакопеременные приливные течения для полыньи-«окна». В разделе 2.6 дается ответ на вопрос: связано ли наличие стационарной припроливной полыньи (и ее характеристик) с климатической зональностью и динамическими характеристиками водообмена. Приводятся данные по распределению лагун со стационарными и устойчивыми полынями по климатическим зонам по классификации Кеппена – Треварта [Кислов, 2011]. 45% и 43% таких лагун расположены в зоне климата тундры FT (со среднемесячной температурой самого теплого месяца в пределах между 0 и 10°C) и зоне субарктического климата EC (со среднемесячной температурой самого холодного месяца ниже - 10°C), соответственно. 12% лагун - в зоне умеренного континентального климата DC (со среднемесячной температурой самого холодного месяца в году ниже 0°C) и субарктическом морском EO (со среднемесячной температурой самого холодного месяца выше -10°C). Для упрощения анализа лагуны

климатических зон DC и EO объединены в одну зону (среднемесячная температура самого холодного месяца в году от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ ).

Интересно, что все припроливные внешние полыньи попали в климатическую зону тундры. Скорее всего, это связано с тем, что там расположены именно дельтовые лагуны, которые являются составной частью хорошо развитых дельт многоводных рек. А, значит, подпор со стороны речного стока выносит лагунные воды в море и препятствует затоку морских вод в лагуну (рис. 3б). 77% полыней-окон также расположены в зоне тундры, что вполне логично, т.к. в этом, наиболее суровом климате, может одновременно замерзнуть и лагуна, и море (рис. 3в). Более половины случаев для припроливной внутренней полыньи относятся к умеренной климатической зоне (рис. 3а).

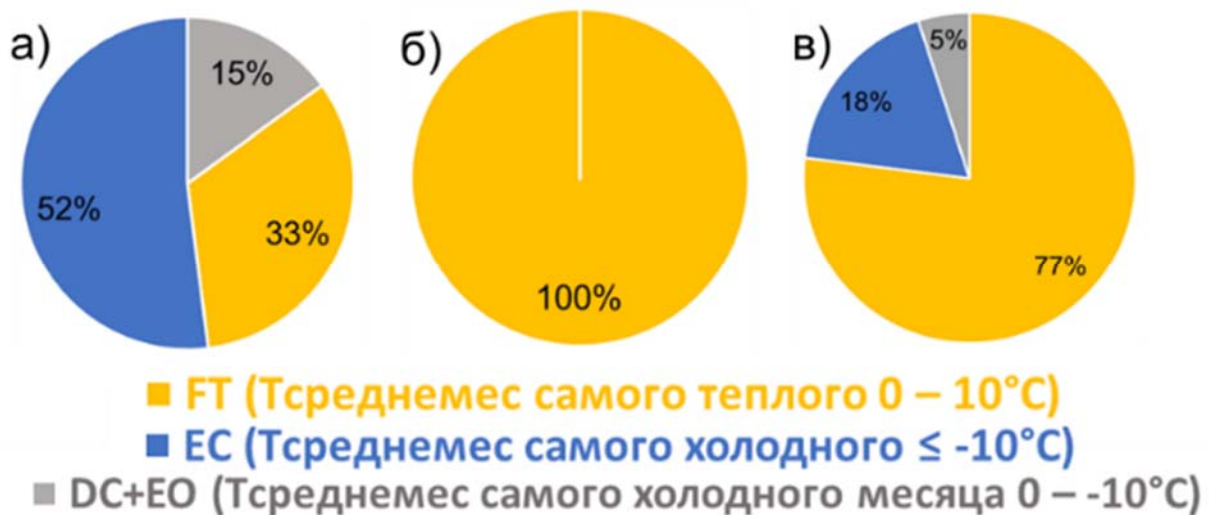


Рисунок 3 – Распределение подтипов припроливной полыньи: внутренней (а), внешней (б), полынья-«окно» (в) по климатическим зонам

Высота подъема уровня около входа в лагуну принята как признак интенсивности водообмена. В 115 лагунах со стационарными и устойчивыми полыньями высота подъема уровня колеблется от 0.05 до 11 м. Среднее и медианное значения высоты подъема уровня составляют – 2.00 м и 1.81 м, соответственно. Было установлено, что припроливные наружные полыньи не существуют при подъеме уровня выше 1 метра (рис. 4). Однако 10% лагун (преимущественно, Берингова и Охотского морей) с припроливными внутренними и полыньями-«окно» имеют максимальный подъем уровня выше 3 метров. Не найдено однотипных для всех рассматриваемых лагун связей между площадью полыньи и высотой подъема уровня

вод в районе входа в лагуну или температурными условиями, что говорит о том, что основополагающие причины образования и поддержания полыней кроются в комбинации местных режимобразующих факторов.

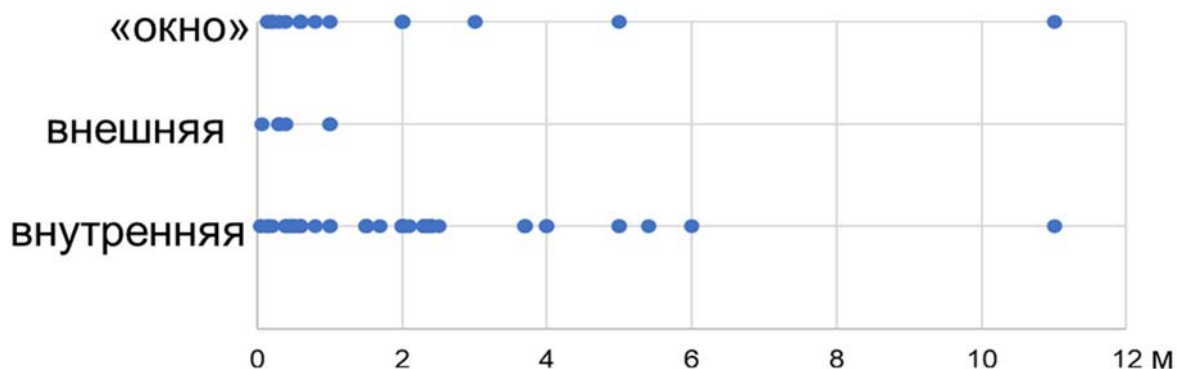


Рисунок 4 – Распределение подтипов припроливной полыньи в зависимости от максимальной высоты подъема уровня моря при приливах или ветровых нагонах

Дополнительный характеристики, включающие геоморфологические изменения, а именно закрытие, открытие и перемещение проливов, описываются в **разделе 2.7**. Они были обнаружены для лагуны Старка (Японское море), лагуны Имикрук (Чукотское море), лагуны Решетникова (море Лаптевых), лагуны Станций (море Лаптевых), лагуны Гутгукуйым (Берингово море), гавани Скобелева (Берингово море). В **разделе 2.8** сделаны выводы по Главе 2

**Глава 3 «ДИНАМИКА ПРИПРОЛИВНОЙ ПОЛЫНИИ В ВИСЛИНСКОМ ЗАЛИВЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ (2011-2021 ГГ.)»** посвящена анализу динамики площади полыньи у Балтийского пролива Вислинского залива Балтийского моря и сопутствующих условий по температуре воздуха, ветровому воздействию и колебанию уровня вод для зим 10–летнего периода с 2011 по 2021 гг.

В **разделе 3.1** приводится физико-географическая характеристика, ледовая обстановка для Вислинского залива, являющегося второй по величине мелководной эстуарной лагуной Балтийского моря (рис. 5).

В **разделе 3.2** представлены основные данные и методы. Исходные данные о площадных характеристиках припроливной внутренней полыньи в Вислинском заливе были получены на основе спутниковых снимков Юго-Восточной Балтики для зимних периодов 2011-2017 в ходе совместной работы с Крек Е.В. (лаборатория геоэкологии Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН) [Zhelezova

et al., 2018]. Доступ к снимкам обеспечивался ООО "ЛУКОЙЛ-КМН" в ходе проводимого им оперативного спутникового мониторинга нефтяного месторождения Кравцовское (Д-6). Всего для наблюдений полыньи было использовано 158 изображений SAR/ASAR. Дополнительные данные Sentinel-2A/B (ESA) были получены из открытой базы данных Copernicus Open Access Hub через сервис обработки и анализа изображений в реальном времени «Land Viewer» (<https://lv.eosda.com>).



Рисунок 5 - Расположение Вислинского залива в юго-восточной части Балтийском моря (а). Полынья, приуроченная к Балтийскому проливу (б) [Zhelezova et al., 2018]

Космические снимки со спутников дистанционного зондирования Земли Aqua и Terra, оснащенных радиометрами MODIS, размещенные в интернет-сервис NASA EOSDIS Worldview (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>) тоже использовались, учитывая периодичность - каждые сутки (в комплексе с Aqua удваивается). Однако,

пространственное разрешение снимков (250-1000 м) и широкая полоса обзора в 2330 км не всегда подходила для полноценного решения задачи по мониторингу полыньи. Привязка спутниковых снимков осуществлялась в системе координат WGS 84, UTM zone 34N (тип трансформации – линейная, метод ближайшего соседа).

В **разделе 3.3** дается характеристика зимних периодов 2011-2021 гг. Метеорологических зим не было зафиксировано в 2014–2015 и в 2019–2020 годах, короткие зимы были в 2011–2012, 2013–2014, 2015–2016 и 2018–2019 годах (24, 23, 27 и 11 дней, соответственно), промежуточные в 2016–2017, 2017–2018, 2020–2021 годах (40, 32 и 37 дней, соответственно), долгая зима была в 2012–2013 (114 дней). В среднем за 10 лет метеорологическая зима в Балтийске длилась 30 дней. Средняя продолжительность ледового периода в 2011-2021 годах составляла 47 дней.

Самый теплый период декабрь-март оказался в 2019–2020 году (полное отсутствие среднесуточных отрицательных температур воздуха), а самый холодный - в 2012–2013 годах (кумулятивная негативная среднесуточная температура с декабря по март составила  $-319.4^{\circ}\text{C}$ ). По суровости зимы разделены на мягкие (2013–2014, 2014–2015, 2015–2016, 2016–2017, 2018–2019, 2019–2020), умеренные (2011–2012, 2017–2018, 2020–2021) и суровые (2012–2013). Наиболее часто регистрируемыми (примерно по 10% от всех измерений) направлениями ветра на заливе в течение зим 2011–2021 годах были южные, западные и восточные ветра со скоростями от 2 до 5 м/с.

В **разделе 3.4** обсуждается изменчивость площади полыньи за 2011-2021 гг. Площади полыньи по 116 замерам всех зимних периодов варьировалась от 0.1 до 28 км<sup>2</sup>, и в среднем составила 8.6 км<sup>2</sup>. Было выяснено что полынья наблюдается в широком диапазоне среднесуточных температур воздуха от  $-14.3^{\circ}\text{C}$  до  $+5.8^{\circ}\text{C}$ . Полынья наблюдалась при колебаниях уровня моря от  $-0,37$  м до  $+0,45$  м.

В **разделе 3.5** приводится анализ связи площади полыньи и гидрометеорологических факторов за 2011-2021 гг. Анализ корреляций между площадью полыньи и среднесуточной температурой воздуха показал, что она положительна, но ее значения не высоки ( $k = 0,4$ ). Несколько более высокая корреляция ( $k = 0,6$ ) была обнаружена между 5–дневной среднесуточной температурой и площадью полыньи. Это означает, что область полыньи не реагировала на быстрые (1 день) колебания температуры воздуха, но имела более медленную (например, 5 дней, 1 неделя) реакцию на такие вариации.



Сравнение изменений площади полыньи с колебаниями уровня моря также дали небольшую по величине, но положительную корреляцию, хотя надежной положительной связи обнаружено не было. Таким, образом, гипотеза о том, что площадь полыньи реагирует только на колебания уровня воды, что может быть показателем притока вод из Балтийского моря, не была непосредственно подтверждена, но и фактов, позволяющих отбросить эту гипотезу, обнаружено не было. Основным недостатком является слишком редкий ряд спутниковых снимков. Данные по площади полыньи получены с шагом несколько дней, а колебания уровня происходят на масштабах нескольких часов – одного дня.

Наиболее вероятно, что приток морской воды определил существование припроливной внутренней полыньи, но не изменение ее размеров в течение ледового сезона. По-видимому, динамика полыньи отражает мультипликативный эффект температуры воздуха, притока морской воды и ветра, и, вероятно, поверхностные волны, идущие с моря через Балтийский пролив.

Таким образом, на примере Вислинского залива показано, что, возникновение и поддержание припроливной полыньи имеет мультифакторную основу. Комбинация таких режимобразующих факторов, как теплообмен между водой и воздухом, регулируемый температурой воздуха и ветром, отжимное действие ветра, проникновение ветрового волнения из моря, скорости течений и колебания уровня, определяют условия существования и размеры полыньи, но главным является водообмен с морской акваторией, предполагающий заток теплых морских вод в лагуну.

В разделе 3.6 приводятся оценки скорости таяния полыньи при контакте с более теплой морской водой. Пользуясь полученными оценками, можно утверждать, что даже при суточном очень активном ( $V_w = 0.5$  м/с) затоке морских вод (температурой, например, 2°C) кромка полыньи отодвинется примерно на 20 м в сутки. Такая скорость таяния не сравнима с теми деформациями полыньи, которые наблюдались в 2012 и 2014 годах на следующих друг за другом снимках, когда кромка полыньи за 2-4 суток могла отступить на 1000 м (250 м/сутки), что примерно в 10 раз превышает полученные оценки.

Высказана гипотеза, что существует механизм расширения полыньи во время роста уровня моря при нагонных ветрах за счет механического движения ледяных

полей вглубь акватории залива, и их последующей фиксации за счет намерзания льда по краям, что не позволяет им вернуться на исходное положение в горловину залива.

Выводы по Главе 3 представлены в **разделе 3.7**.

В **Главе 4 «ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОЛЫНИ В ВИСЛИНСКОМ ЗАЛИВЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2021 г.»** представлены данные прямых измерений гидрологических условий в припроливной части Вислинского залива при разных фазах водообмена. Используются данные экспедиционных работ зимой 2021 года в сравнении с аналогичными данными экспедиционных работ по изучению водообмена залива с морем в летний период.

В **разделе 4.1** перечислены основные характеристики измерительных приборов, параметры измерений, сроки, географический район съемок. Общая карта объема работ со станциями гидрологических измерений представлена на рисунке 6.

В **разделе 4.2** подготовлены данные по метеорологическим и гидрологическим условиям, обеспеченности спутниковыми снимками во время измерений. В период с 10 января по 28 февраля 2021 года было зафиксировано три периода сильного понижения среднесуточной температуры воздуха (до  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ): с 16 по 19 января, с 6 по 12 февраля и с 15 по 20 февраля 2021 года. 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 имел два явных подъема, одно значительное и одно незначительное падения, и несколько промежуточных положений близ отметки в 0 метров. Всего на период наблюдений было собрано 23 спутниковых снимка (Sentinel - 2A/B, MODIS Aqua, Landsat - 8), по 8 из них измерена площадь полыньи, и еще 5 подтвердили наличие полыньи в ледяном покрове залива.

В разделах 4.3, 4.4 и 4.5 анализируются результаты, полученные в фазах затока, стока и переходного периода.

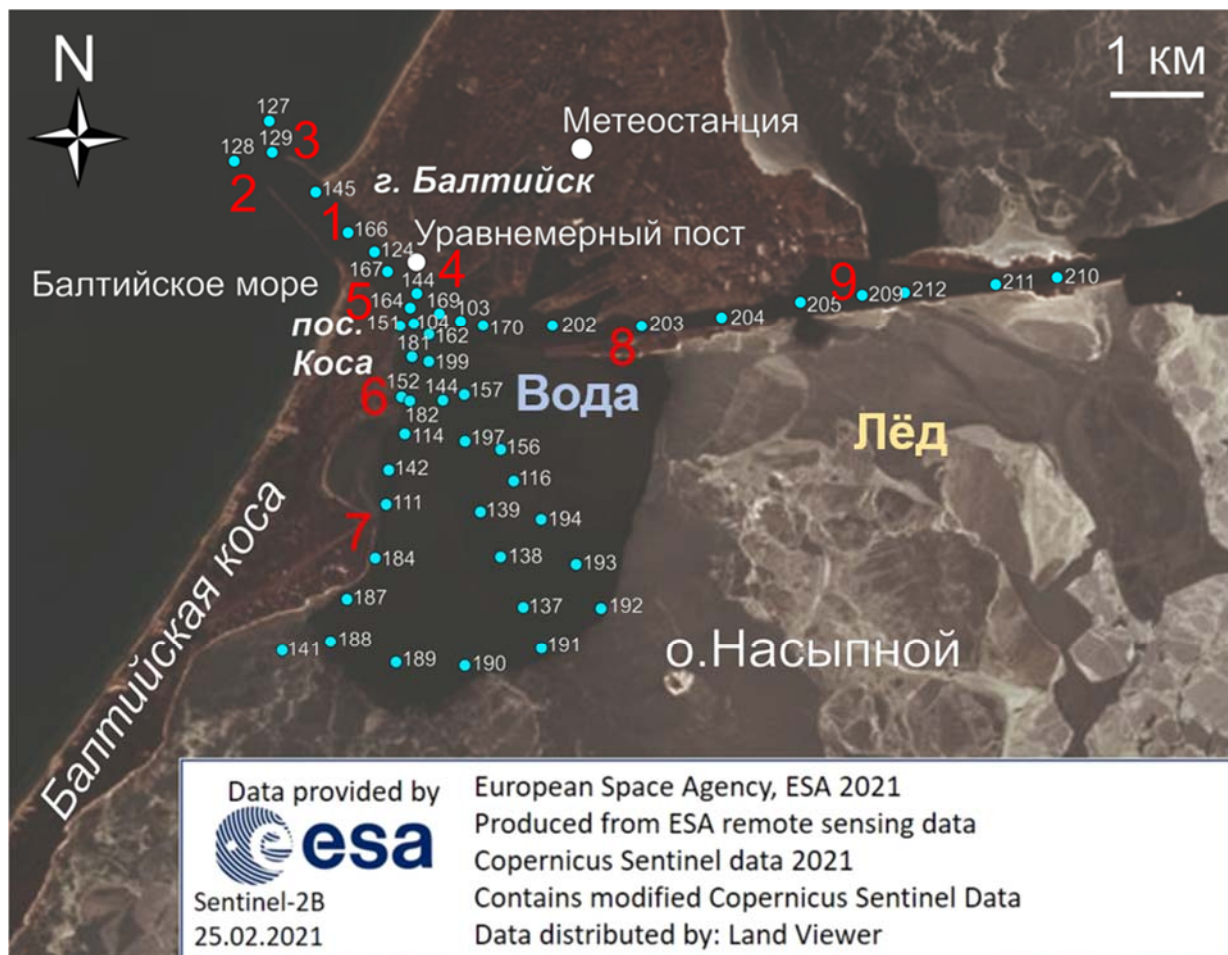


Рисунок 6 - Карта станций вертикальных зондирований в Вислинском заливе зимой 2020-2021 гг. (16-19 января, 25 января, 13-14 февраля, 18 февраля и 25 февраля 2021 г.): 1 – Балтийский пролив, 2 – Южный морской мол, 3 – Северный морской мол, 4 – Паромная пристань в Балтийске, 5 – Пирс в пос. Коса на Балтийской косе, 6 – Восточный мол Гидрогавани, 7 – Западный мол Гидрогавани, 8 - Первый остров дамбы Калининградского Морского Канала, 9 – Калининградский Морской Канал (КМК)

В разделе 4.3. разбираются четыре случая затока морских вод в Вислинский залив (16 января, 25 января, 13 февраля, 14 февраля 2021 г.).

В разделе 4.4 анализируются ситуация стока. В течение периода измерений было зарегистрировано четыре ситуации стока вод из залива в море (17 января, 18 января, 18 февраля, 25 февраля 2021 г.).

В течение периода измерений только результаты для 19 января 2021 г. можно отнести к переходной ситуации между стоком и затоком, они обсуждаются в разделе 4.5.

В разделе 4.6. приводятся основные выводы о связи динамики полыньи с морскими затоками (рис. 7).

При стоке у поверхности обнаружена распресненная заливная вода (около  $0^{\circ}\text{C}$  и 6.0 PSU), а в придонной области на больших глубинах в судоходном канале просматривается «язык» более теплой ( $3.9^{\circ}\text{C}$ ) и более соленой (7.4 PSU) морской воды, являющийся предвестником события затока. Сток способствует замерзанию льда и уменьшению площади полыньи. Кромка льда находилась над вершиной песчаного бара, примерно в 2 км от Балтийского пролива.

На характерном графике для события затока морская вода с соленостью 7.5 PSU и температурой  $3.8^{\circ}\text{C}$  занимает всю толщу, от дна до поверхности, и только у самой кромки льда в приповерхностном слое соленость и температура воды оказываются несколько сниженными, т.е. морская вода достигает непосредственно кромки льда и не только поддерживает площадь полыньи, но и способствует ее увеличению.

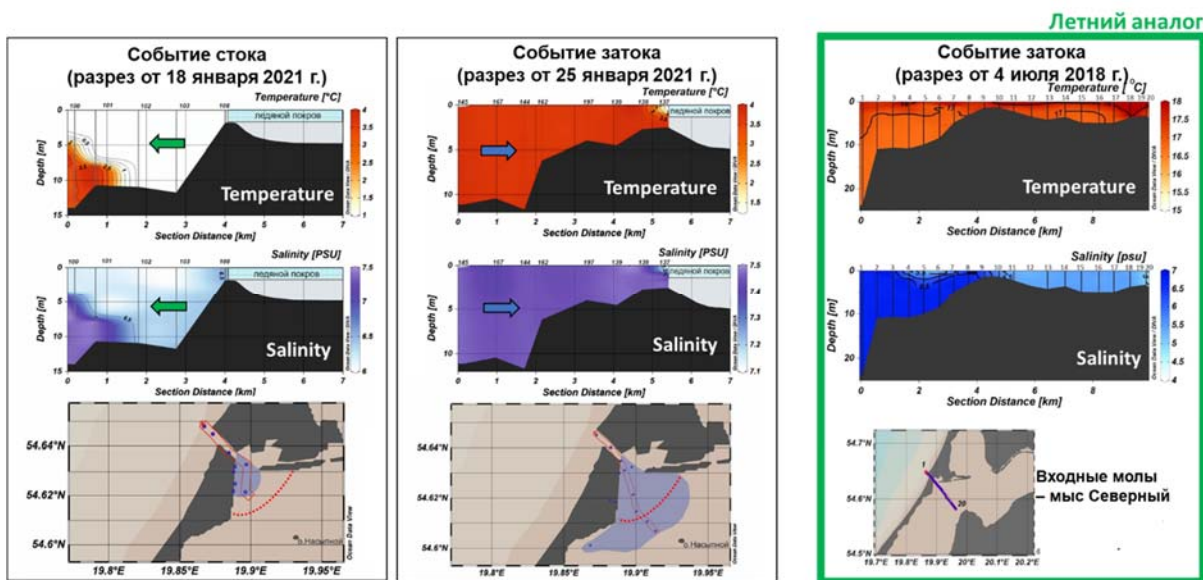


Рисунок 7 – Вертикальные разрезы при стоке и затоке в условиях ледяного покрова на Вислинском заливе

Обобщающая схема (рис. 8) подготовлена по данным предшествующих летних экспедиционных работ по изучению процесса водообмена между морем и заливом. Она представляет собой поперечный разрез по линии от входных молв Балтийского пролива к мысу Северный полуострова Бальга. 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 залива на поверхности стабилизируется и будет вскоре отеснена назад развивающимся стоком более пресных заливных вод.

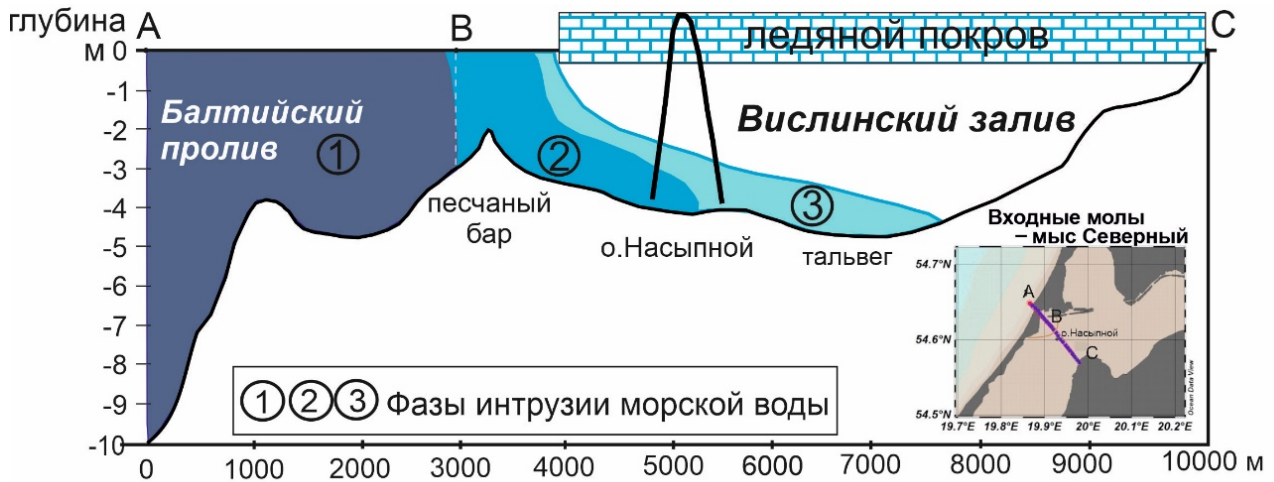


Рисунок 8 – Схематическое изображение внедрения интрузий морской воды в Вислинский залив

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 являются регулярными (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.

Зона полнообъемного проникновения вод в залив находится только в окрестностях подводного бара, служащего естественным подводным препятствием, обеспечивающим турбулизацию и перемешивание затекающих вод. И в зимний период именно эта зона остается свободной ото льда, т.к. более теплые морские воды находятся на поверхности и не позволяют льду образовываться.

Пример Вислинского залива Балтийского моря показал, что характеристики стационарной припроливной полыньи (ее площадь и форма) в прибрежной эстуарной лагуне определяются условиями водообмена между прилегающей морской акваторией и лагуной. Полынья формируется в зоне залива более теплых морских вод в акваторию лагуны, и тем самым служит индикатором глубины полнообъемного проникновения интрузий морских вод в акваторию лагуны.

В **Заключении** представлены основные результаты работы:

1. Создана база данных из 3000 спутниковых снимков за период с 2013 по 2020 годы полыней в прибрежных лагунах умеренной, субарктической (бореальной) и полярной климатических зон Северного полушария, которая может быть использована при постановке дальнейших более детальных задач в изучении как ледяного покрова прибрежных лагун, так и предварительной диагностики расположения зоны активного водообмена с морской акваторией и преимущественного типа и причин этого водообмена.
2. Выполнено районирование берегов Северного полушария по наличию полыней в замерзающих лагунах. Стационарные и устойчивые припроливные полыньи являются характерной чертой замерзающих прибрежных лагун, расположенных в умеренном, субарктическом (бореальном) и полярном климатах Северного полушария, не анализировавшейся ранее. Такие полыньи ежегодно присутствуют в 47% (115 из 246) замерзающих лагун (из них - на побережьях Северного Ледовитого океана – 39%, Тихого океана – 63%, Атлантического океана - 33%).
3. Стационарные и устойчивые полыньи в лагунах можно подразделить на два типа: припроливная полынья, приуроченная к проливу, соединяющему акватории лагуны и моря, с тремя подтипами – внутренняя (расположенная в акватории лагуны); внешняя (вне лагуны в замерзшей морской акватории); полынья-«окно» (замкнутое образование в районе пролива между барьерными островами, при этом как лагуна, так и прилежащая акватория моря покрыты льдом); проточная полынья, существующая внутри акватории лагуны и приуроченная к устью впадающей реки, образующаяся за счет активного потока речных вод.
4. В 115 лагунах умеренной, субарктической (бореальной) и полярной климатических зон Северного полушария в 75% случаев встречается припроливная внутренняя, 19% - полынья- «окно» и в 6% - припроливная внешняя полынья. Анализ связи наличия и величины полыньи с условиями по температуре воздуха и высоте подъема уровня моря в районе входа в лагуну (признак интенсивности водообмена) надежно выявил только факт, что внешняя припроливная полынья встречается в устьевых дельтовых лагунах крупных рек и в районах, где колебания уровня не превышают 1 м.

5. Используя имеющиеся спутниковые снимки за период с 2011 по 2021 годы стационарной полыньи у Балтийского пролива в Вислинском заливе Балтийского моря и гидрометеорологические данные, было выявлено, что существование припроливной полыньи в Вислинском заливе имеет мультифакторную основу. Комбинация таких режимообразующих факторов, как: теплообмен между водой и воздухом, регулируемый температурой воздуха, влажностью и ветром, отжимное действие ветра, проникновение ветрового волнения из моря, скорости течений и колебаниям уровня определяют условия существования и размеры полыньи, но главным фактором является заток теплых морских вод в лагуну (водообмен с морской акваторией).

6. Проанализированные результаты гидрологических съемок в области смещения морских и заливных вод при наличии полыньи в Вислинском заливе в зимний период с 16 января по 25 февраля 2021 года позволили сравнить ситуации стока, затока и переходного периода, и создать принципиальную схему внедрения интрузий морской воды, поддерживающей припроливную полынью и реализующихся в конкретных условиях узости пролива и наличия подводного бара.

7. Пример Вислинского залива Балтийского моря показал, что характеристики стационарной припроливной полыньи (ее площадь и форма) в прибрежной эстуарной лагуне определяются условиями водообмена между прилегающей морской акваторией и лагуной. Полынья формируется в зоне затока более теплых морских вод в акваторию лагуны, и тем самым служит индикатором глубины проникновения полнообъемных интрузий морских вод в акваторию лагуны.

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:*

1. **Zhelezova E.** Characteristics of the polynya in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea by remote sensing data / **E. Zhelezova**, E. Krek, B. Chubarenko // International Journal of Remote Sensing. – 2018. – P. 9453-9464. – DOI:10.1080/01431161.2018.1524181
2. **Zhelezova E.V.** Recurring polynyas in the coastal lagoons of the northern hemisphere / **E.V. Zhelezova**, B.V. Chubarenko // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2021.– Vol. 254. – 107353. – <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107353>
3. **Железова Е.В.** Зимние периоды в Вислинском-Калининградском заливе Балтийского моря по метеорологическим данным в 2011–2021 годах / **Е.В. Железова** // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 8 (110). – Ч1. – С. 184-191. – <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.031>