

УДК 551.467:556.54

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕНСКОЙ ПОЛЫНИИ НА УСТЬЕВОМ ВЗМОРЬЕ БЫКОВСКОГО РУКАВА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

© 2023 г. Р. Я. Миньковская\*, \*\*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр  
“Морской гидрофизический институт РАН” (МГИ), Севастополь, Россия

\*e-mail: rosmink@yandex.ru

\*\*e-mail: rminkovskaya@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 24.08.2022 г.

После доработки 19.09.2022 г.

Принята к публикации 24.11.2022 г.

На основе результатов глобального океанического реанализа (GLORYS12.v.1), материалов гидрометеорологических наблюдений сети Росгидромета в море Лаптевых и устье р. Лены, обзоров ААНИИ ледовых процессов в Северном Ледовитом океане рассмотрены особенности эволюции Ленской полыньи на устьевом взморье Быковского рукава в теплый период 1993–2019 годов. Выявлена связь сроков образования полыньи на взморье этого рукава с датами начала половодья в вершине дельты р. Лены. Подтверждено предположение, что средняя скорость роста полыньи летом определяется сроками ее образования – чем раньше начинается половодье, тем раньше образуется полынья на взморье Быковского рукава и меньше средняя скорость увеличения ее размеров. Установлено, что процесс потепления в устьевой области р. Лены в 2008–2019 гг. стабилизировался, поскольку отсутствуют значимые тенденции характеристик водного и ледового режимов. Указанные закономерности могут быть инвариантными для других устьев рек бассейна моря Лаптевых, а полученные зависимости можно использовать для усовершенствования прогноза дат очищения акватории устьевого взморья р. Лены ото льда и планирования безледокольной навигации по маршруту порт Тикси–р. Лена.

**Ключевые слова:** Ленская полынья, взморье Быковского рукава, дата половодья, средняя скорость роста полыньи

**DOI:** 10.31857/S0030157423020089, **EDN:** NSFKYL

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе под “Ленской полыней” подразумевается комплекс полыней, образующихся на устьевом взморье р. Лены в различные сезоны года. Кроме наиболее изученной заприпайной полыньи, существующей зимой в северной части взморья, весной и летом образуются локальные полыньи на устьевых взморьях ленских рукавов (проток).

Размеры полыней в ледяном покрове арктических морей не только регламентируют безопасность навигации, но и могут влиять на региональный климат, так как изменяют теплообмен между водой и окружающей средой [9, 19]. Поэтому исследование эволюции полыней является актуальной и социально значимой задачей океанологии и смежных наук.

Выявлению закономерностей формирования и развития полыней посвящены работы многих авторов [9, 10, 19, 21, 24]. Ими установлено, что на

образованием полыней оказывают влияние атмосферные процессы [9, 11, 19, 23], изменяющие интенсивность поглощения водой суммарной солнечной и тепловой радиации, а также потерь тепла при теплообмене и испарении [9, 10]. По мнению авторов работы [11], сроки очищения ото льда восточной части моря Лаптевых зависят от характеристик ледяного покрова, а также средних значений температуры воздуха в мае и июне. Ю.В. Налимов, Р.В. Донченко, С.В. Борщ, Б.М. Гинзбург, К.Н. Полякова, И.И. Солдатова, В.В. Иванов, Н.А. Доронина, Н.А. Демиденко, Ю.В. Лупачев, Н.Л. Фролова, Д.В. Магрицкий, З.С., М.В. Третьяков, В.Ю. Третьяков и др. [2, 6, 8–17, 19–25] рассматривали ледовый режим отдельных частей морских устьев арктических рек и возможности прогнозирования его характеристик на основе физико-статистических зависимостей, балансовых расчетов и математического моделирования. Авторы работ [6, 19] основное внимание уделяли

образованию заприпайных полыней в декабре—марте, отмечая их роль в формировании ледовых условий тех же акваторий в летний период [19].

Летом существенное влияние на ледовые условия плавания в арктических морях также оказывают полыньи, образующиеся на устьевых взморьях рек, например, Ленская полынья, которая ежегодно формируется в южной части моря Лаптевых, на взморье рук. Быковского, в июне—августе. С началом половодья в устьевых рукавах р. Лены увеличивается сток воды и тепла, особенно после прорыва заторов льда, которые бывают в нижнем течении реки ежегодно и достигают размеров 50—100 км [9]. При этом на взморье р. Лены повышается уровень воды и активизируются стоковые течения, что способствует размыву, стаиванию и взлому припая, а также выносу льдин в море. В то же время, влияние половодья на образование полыньи в весенне-летний период изучено недостаточно.

Количество пресной воды ( $550 \text{ км}^3$ ) и тепла ( $16 \times 10^{15} \text{ кДж}$ ), поступающее в среднем за год в море Лаптевых со стоком р. Лены [13], может влиять на тепловой и ледовый режимы не только устьевого взморья, но и других районов моря. Так, в работе [16] указано, что в среднем 22% площади акватории моря Лаптевых подвержено влиянию стока рек, 75% которого составляет сток р. Лены. Влияние адвекции тепла крупных сибирских рек (Оби и Енисея) на ледовый режим морей показано в ряде работ Налимова Ю.В. и других авторов, где установлено, что разрушение льда на расстоянии 130—220 км от места впадения рек в приемный водоем происходило на 60—100% под действием стока их тепла [2, 16].

Летом на взморьях Быковского (108 км), Трофимовского (210 км) и Оленекского (31 км) рукавов [3, 17], через которые в половодье проходит около 80%, а в межень — 90—95% годового стока реки [16], начинается образование полыней. Сроки начала половодья в устье р. Лены зависят от температуры воздуха, влагозапасов в почве и снежном покрове, сроков и интенсивности снеготаяния, дружности половодья, величины стока притоков и самой реки [9, 13, 15, 16, 22]. Волна половодья в русле р. Лены распространяется со скоростью 100 км/сут [9], замедляясь к устью реки и существенно трансформируясь в устьевых рукавах. Например, подъем уровня воды в устье рук. Быковского и на его устьевом взморье в половодье отличается в десятки раз из-за регулирующего влияния поймы при затоплении дельты реки [13].

На устьевом участке р. Лены и в вершине дельты половодье начинается 10—30.05, в устьях рука-

вов — 05—10.06 [9]. Чаще всего в июне—августе на устьевом взморье рук. Быковского образуется полынья. Пространства чистой воды, появляющиеся в более ранние сроки (7% случаев), имели сравнительно небольшие размеры и быстро вновь покрывались льдом. В эти годы обычно отмечалось неоднократное образование полыньи, что было связано с чередованием оттепелей и похолоданий.

Несмотря на то, что информация об изменениях степени покрытия льдом различных участков акватории моря Лаптевых представлена в глобальном океаническом реанализе GLORYS12.v1 [26], ранее она не использовалась для определения даты начала образования Ленской полыньи на устьевом взморье рук. Быковского в весенне-летний период.

Связи дат образования Ленской полыньи и средней скорости ее роста с датами начала половодья на устьевом участке реки или в вершине дельты р. Лены не были установлены, что не позволяло их учитывать при прогнозировании изменений ледовитости районов моря Лаптевых на подходах к порту Тикси в период полярного дня (май—август).

Предполагаемое потепление климата [8, 10, 13, 15, 23—25] может привести к более ранним датам образования Ленской полыньи летом, например, в мае, когда средняя месячная температура воздуха над устьевым взморьем равна минус  $6^\circ\text{C}$  [4]. Это вызовет увеличение теплопотерь поверхности полыньи в атмосферу, так как в это время температура поступающей с речным стоком воды — около нуля и тепловой баланс полыньи отрицательный [5]. Рост полыньи замедлится, она может вновь покрыться льдом. То есть в этот период полынья не аккумулирует тепло [19], а теряет. Чем позже образуется полынья, тем быстрее она увеличивается в размерах, поскольку с июня по август температура воздуха ( $6\text{--}9^\circ\text{C}$ ) больше температуры воды ( $1\text{--}5^\circ\text{C}$ ) и приход тепла из атмосферы превышает теплопотери [4, 6]. К тому же максимальный сток тепла р. Лены, поступая на устьевое взморье в июле — августе, когда и температура воздуха максимальна, усиливает эффект роста полыньи в теплый период года. Поэтому предполагалось, что даты образования полыньи на взморье рук. Быковского летом связаны с датами начала половодья в вершине дельты, и чем раньше в период полярного дня образуется полынья, тем медленнее увеличиваются ее размеры. Ранее справедливость этого предположения не проверялась, а особенности эволюции Ленской полыньи под воздействием радиационно-тепловых и динамических факторов, при различных датах очищения ото льда устьевых взморьев рукавов, не исследовались, хотя этот вопрос представ-



**Рис. 1.** Устье р. Лены, с сеточной областью реанализа на взморье Быковского рукава. Рукава: 1 – Трофимовский; 2 – Сардахский; 3 – Туматский; 4 – Арынский; 5 – Оленекский.

ляет теоретический и практический интерес. Его решение позволило бы эффективнее использовать информацию сети Росгидромета [1, 4, 8] для оценки вероятного значения средней скорости роста и прогнозирования размеров полыньи на определенную дату, а также обеспечения безопасности судоходства.

Объектом исследования выбран наиболее изученный судоходный участок устьевого взморья Быковского рукава р. Лены, на котором ежегодно образуется полынья (рис. 1).

Цель работы – выявление особенностей и закономерностей эволюции Ленской полыньи на взморье Быковского рукава в летний период. Для этого на основе реанализа GLORYS12.v.1, данных многолетних наблюдений сети Росгидромета и комплексных обзоров ГНЦ РФ Арктического и антарктического института Росгидромета (АНИИ) рассмотрена изменчивость гидрометеорологических характеристик в устье р. Лены, включая даты начала половодья и образования полыньи на устьевом взморье, среднюю скорость ее роста (ССР)

и степень покрытия акватории льдом (СПЛ), и получены зависимости дат образования полыньи на устьевом взморье рук. Быковского р. Лены и ССР от обуславливающих факторов.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве информационной базы использованы средние суточные за период 01.01.1993–31.12.2019 гг. значения степени покрытия льдом акватории моря в узлах координатной сетки, шагом 5 угловых минут, представленные в реанализе GLORYS12.v.1 [26]. Указанные массивы данных реанализа подготовлены, апробированы в работах и любезно предоставлены Холопцевым А.В. [23], предложившим сделать данное исследование.

Сопоставление значений СПЛ по данным GLORYS12.v.1 с информацией, представленной в обзорах ледовых условий моря Лаптевых, подготавливаемых ААНИИ [17], подтвердило наличие удовлетворительного соответствия между ними, исключая 4.8% информации реанализа, которая в расчетах не использовалась. Сеть реанализа и объект исследования показаны на рис. 1.

Согласно [7], полыньей называется участок чистой воды в ледяном покрове водного объекта, образовавшийся под влиянием динамических и термических факторов. Образованию полыньи могут предшествовать снежины, подвижки льда, трещины, закраины, промоины, проталины, взлом припая и дрейф льда [9]. Полыньи могут образовываться несколько раз за сезон. За дату устойчивого образования полыньи (ДОП) принималась дата, когда средние суточные значения СПЛ в узлах сеточной области были равны нулю, то есть в пределах данной ячейки сетки, площадью 27 км<sup>2</sup>, в рассматриваемом районе моря полностью сформировалась полынья.

Анализ изменчивости метеорологических характеристик в рассматриваемом регионе выполнялся за 1993–2019 гг. по данным Федерального государственного бюджетного учреждения “Все-российский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных” по метеостанциям в поселке городского типа (пгт) Тикси (бухта Тикси, 71.80° с.ш., 128.58° в.д.) и с. Кюсюр (р. Лена, 70.69° с.ш., 127.36° в.д.), представленным в [4]. Сведения о гидрологических характеристиках по водпосту (в/п) Кюсюр (р. Лена, 70.68° с.ш., 127.36° в.д.) и полярной станции (п/с) им. Ю.А. Хабарова (рук. Быковский, в 4.7 км выше о. Столб, 72.40° с.ш., 126.85° в.д.) были взяты из банка данных АИС ГМВО – Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов [1].

Измерения уровня воды и определение расхода воды в 1993–2007 гг. на в/п Кюсюр и п/с Хабарова не проводились [1, 13]. Данные о расходах воды р. Лены были пониженного качества, а с 2012 г. на в/п Кюсюр расход воды не измерялся [13]. Поскольку имелась прямая зависимость (с коэффициентами корреляции 0.93–0.98 за разные периоды) между уровнем и расходом воды на п/с Хабарова, предполагалось, что большему уровню воды соответствовал больший расход. Такая зависимость нарушалась только в пик половодья, когда уровень воды превышал 600 см и затапливалась дельта. Поэтому за начало половодья принимался первый день устойчивого повышения уровня воды на п/с Хабарова. В среднем такой подъем уровня составлял 8 см/сут (изменяясь в пределах 6–12 см/сут). Из-за пропусков стационарных наблюдений в 1993–2007 гг. сравнительный анализ изменчивости гидрометеорологических характеристик выполнялся за период 2008–2019 гг., и за этот же период строились зависимости дат образования полыньи от обуславливающих факторов.

За этот же период по материалам ААНИИ, представленным в ежеквартальных “Обзорах гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане” [17], выполнялся анализ особенностей ледового режима устьевого участка и устьевого взморья р. Лены. При этом использовались совмещенные региональные карты ААНИИ, Канадской ледовой службы и Национального ледового центра США, а также результаты анализа сотрудниками ААНИИ спутникового мониторинга, наблюдений полярных станций системы Росгидромета, экспедиционных судовых наблюдений и дрейфующих станций [17].

Изменчивость средних суточных значений уровня (в отклонениях от геоида), толщины льда и солёности воды на устьевом взморье рук. Быковского анализировалась по данным реанализа [26] за период образования полыньи (с 01.05 по 31.08) в 1993–2019 гг. для станции с координатами 71.67° с.ш. и 130.08° в.д. (рис. 1).

Для исследования пространственной и временной изменчивости гидрометеорологических характеристик и взаимосвязей дат начала половодья, сроков образования полыньи и ее ССР, а также оценки их тесноты и достоверности применялись стандартные методики статистического анализа информации. Оценка достоверности коэффициентов корреляции коротких выборок выполнялась по критерию Стьюдента при уровне значимости 0.05. Тенденции оценивались по критерию Фишера для вероятности неравенства нулю углового коэффициента на уровне 95% [18]. Полученные результаты сравнивались с данными

предшествующих исследований [6, 8, 10, 13–15, 17, 21–25].

Выбор расчетного периода, 1993–2019 гг., обусловлен наличием имеющейся в свободном доступе информации о СПЛ, уровне, солености воды и толщине льда в море Лаптевых. Этот период характеризуется как более теплый [5, 8, 10, 13, 15, 22, 24, 25] по сравнению с предыдущим климатическим периодом 1961–1990 гг., принятым за исторический базовый.

Рассматривался район устьевого взморья рук. Быковского р. Лены, ограниченный  $71.67–72.34^\circ$  с.ш.  $129.08–131.25^\circ$  в.д., площадью  $5700 \text{ км}^2$ , по которому проходит судоходный путь из порта Тикси в населенные пункты, расположенные в бассейне р. Лены (рис. 1). В более северном районе (устьевое взморье рук. Трофимовского) характеристики тепловых и ледовых процессов были близки к их значениям на взморье рук. Быковского, процессы взаимодействия речной и морской воды идентичны, а сроки наступления основных фаз ледового режима синхронны [6, 17], что соответствует выводам работы [11].

Для определения средней скорости роста полыни ( $ССР_{i,j}$ ) применялся метод изохронного датирования. Ежегодные значения  $ССР_{i,j}$  полыни на взморье рук. Быковского оценивались по изохронам очищения акватории взморья ото льда по формуле

$$ССР_{i,j} = L_{i,j} / \Delta D_{i,j}, \quad (1)$$

где  $ССР_{i,j}$  – средняя скорость роста полыни по широте в  $i$ -том створе взморья в  $j$ -том году, км/сутки;  $L_{i,j}$  – расстояние между изохронами на мористой ( $D_{2,i,j}$ ) и прибрежной ( $D_{1,i,j}$ ) границах образовавшейся полыни, км;  $\Delta D_{i,j} = D_{2,i,j} - D_{1,i,j}$  – разность дат между изохронами, на указанных границах полыни, сутки. При этом  $D_{2,i,j}$  – последняя дата существования полыни, а  $D_{1,i,j}$  – начальная дата образования полыни в  $i$ -том створе взморья в  $j$ -том году.

Выявленные ниже особенности образования Ленской полыни в летний период 1993–2019 гг. учитывались при определении  $ССР$ , которая рассчитывалась для створа на взморье рук. Быковского с координатами  $72.00^\circ$  с.ш. и  $129.08–131.25^\circ$  в.д. (рис. 1).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Особенности образования Ленской полыни летом.** Анализ ледового режима устьевого взморья р. Лены по материалам [17] и расчеты дат образования полыни на устьевом взморье рук. Быковского по данным реанализа [26] показали, что

Ленская полыня (Анабаро-Ленская [19]) неоднородна по генезису и времени существования. В северной части устьевого взморья р. Лены с декабря по апрель формируется заприпайная полыня, представляющая собой пространства чистой воды, первичных форм льда, плавающего молодого льда разной сплоченности и ниласа, толщиной до 30 см [17]. В это время устьевое взморье рук. Быковского покрыто припаем, в среднем толщиной около 1 м, который здесь отмечается с декабря по май–июнь. Поэтому в июне, когда северная часть устьевого взморья р. Лены уже на 100% свободна ото льда, взморье рук. Быковского только с вероятностью 58% полностью очищается ото льда, в июле – с вероятностью 83 и на 100% в августе все устьевое взморье р. Лены свободно ото льда. Согласно данным [17], образующая зимой в северной части устьевого взморья р. Лены заприпайная полыня в летний период соединяется с полыней, формирующейся летом на устьевых взморьях Трофимовского и Быковского рукавов. Таким образом, в мае–августе на устьевом взморье р. Лены обычно существует два центра очищения ото льда – полыня на севере (повторяемость образования – 83%) и полыни на взморьях Быковского и Трофимовского рукавов (повторяемость образования – 100%) на юго-востоке (рис. 1). В отдельные годы, когда юго-восточные отроги заприпайной Ленской полыни распространялись в восточную или центральную части устьевого взморья рук. Быковского, отмечалось более раннее, чем в прибрежных районах, очищение ото льда именно этих участков акватории, так как лед здесь был тоньше (нилас или молодой лед). Этому также способствовала большая аэродинамическая нагрузка на лед мористых участков устьевого взморья и его большая прозрачность и меньшая прочность [9] по сравнению со льдом прибрежных более опресненных и заснеженных участков устьевого взморья р. Лены.

В летний период устьевые взморья рассматриваемых крупных рукавов наиболее интенсивно очищались ото льда под действием стока реки. И хотя сток рук. Трофимовского в среднем был в 2 раза больше стока рук. Быковского, по данным [17], образование полыней на взморьях обоих рукавов происходило одновременно. Возможной причиной этого явилось перераспределение стока рук. Трофимовского в пользу рук. Сардахского, который через протоки подпитывает рук. Быковский, что наиболее активно проявляется после углубления русла рук. Сардахского почти в 3 раза [3]. Кроме того, в работе [13] установлено, что чем больше сток р. Лены в замыкающем створе реки, тем меньше доля стока рук. Трофимовского и больше сток рук. Быковского, а в много-

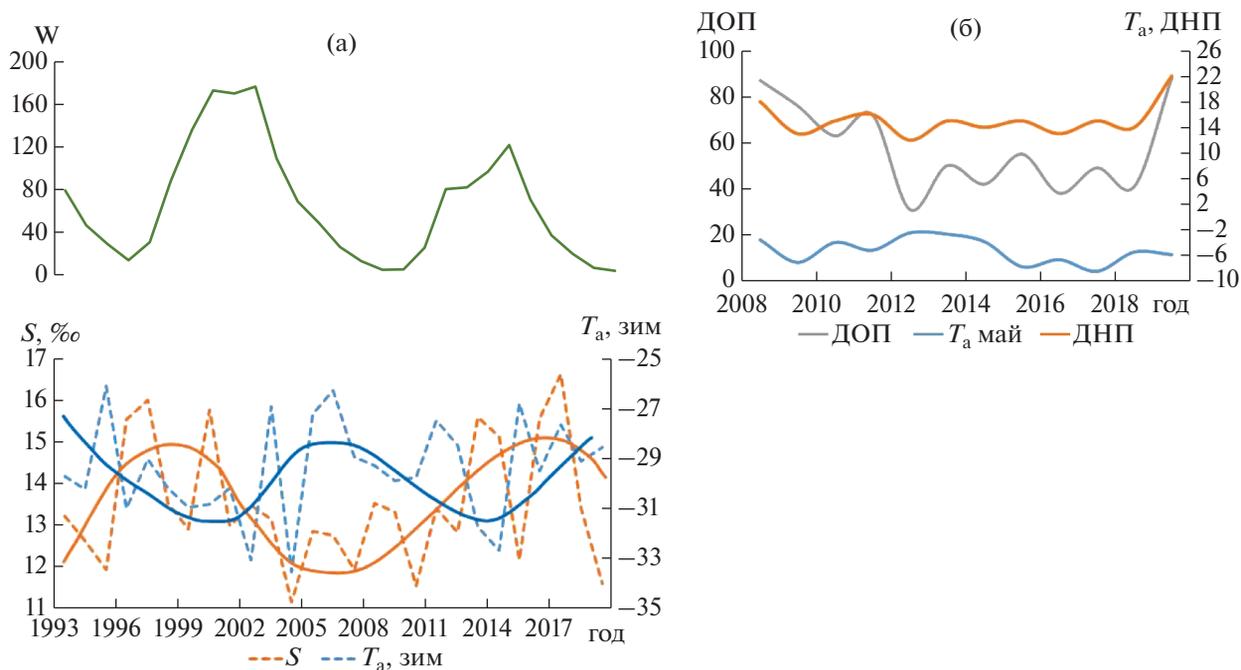
водные годы оба этих рукава сливаются в единый поток, который поступает на устьевое взморье. Сток р. Лены по рукавам, расположенным северней (Оленекскому, Арынскому, Туматскому), и более мелким рукавам Трофимовской системы (рис. 1) поступает в море Лаптевых рассредоточенным потоком. Поэтому его влияние на разрушение ледяного покрова (а также его таяние и вынос) с соответствующих участков взморья в период половодья может быть менее значимым, чем влияние стока Быковского и Трофимовского рукавов на взморье р. Лены. Возможно, на очищение ото льда взморьев северных рукавов большее влияние оказывает заприпайная полынья. К тому же в результате действия Сибирского вдольберегового течения (и силы Кориолиса), направленного на юго-восток, вода и тепло, поступающие на устьевое взморье р. Лены из более северных рукавов, перемещаются на взморье рук. Быковского (рис. 1), тем самым усиливая здесь комплексное воздействие речного стока на ледяной покров. Подтверждением этого является соленость взморья рук. Быковского, которая в 2–3 раза меньше солености воды остальной части устьевого взморья р. Лены [6, 17]. Также в работе [3] показано, что за 25-летний период глубины на взморье рук. Быковского увеличились примерно на 1 м, а в северном и северо-западном районах устьевого взморья р. Лены аналогичных изменений не произошло. Причиной этого, согласно работе [12], могло быть протаивание поддонных многолетнемерзлых пород, обусловленное увеличением стока тепла рук. Быковского [13], а также температуры воды (увеличившейся на 2°C) и теплового запаса соответствующего устьевого взморья.

В годы с близкими к средним многолетним значениям гидрометеорологическими характеристиками, предшествующими образованию полыньи на взморье р. Лены, площади акваторий, свободных ото льда, были в 2 раза больше, если полынья образовывалась на месяц позже средней многолетней даты, и почти в 30 раз больше, если она образовывалась на два месяца позже нее [17]. Это согласуется с выводами работы [25], в которой показано, что при более поздних датах очищения ото льда ледовитость моря Лаптевых летом уменьшалась на 10–50%. При этом чем больше был сток половодья, тем раньше образовывалась полынья. Увеличение максимального расхода воды р. Лены в половодье в 1.5–2 раза (при одинаковых метеорологических условиях) смещало сроки образования полыньи на устьевом взморье на более ранние почти на месяц. Это свидетельствует о зависимости не только ССР, но и размеров полыньи от даты ее образования и величины стока ре-

ки. Так, более раннее образование Ленской полыньи, при устойчивом потеплении, могло приводить к увеличению ее размеров в летний период, потому что наличие в припае затянувшейся более тонким льдом ранее образовавшейся полыньи или распространение на взморье рук. Быковского заприпайной полыньи облегчало формирование пространств чистой воды при последующем потеплении.

В связи с существенной ролью стока рук. Быковского на образование полыньи на его устьевом взморье летом, этот участок Ленской полыньи в дальнейшем рассмотрен более детально. Установлено, что здесь в 72% случаев образования полыньи фронт очищения ото льда распространялся с запада на восток, а с повторяемостью 15% участок вскрывался и очищался ото льда на западных и восточных границах (иногда одновременно), при этом в его центральной части сохранялся “ледяной пояс” из неподвижного льда. Полынья в середине взморья образовывалась в 5% случаев, а в 8% случаев раньше вскрывалась его восточная часть. Аналогичные процессы отмечались и на устьевом взморье более северного Трофимовского рукава. Поэтому результаты анализа вполне применимы и для него.

**Многолетняя изменчивость факторов образования полыньи.** Температурные условия зимнего сезона в 1993–2019 гг. по данным метеонаблюдений в пгт Тикси и п/с Хабарова [4] значимых тенденций не имели. Значимые положительные тенденции средней месячной температуры воздуха отмечались в марте, апреле (0.2°C/год) и с августа по ноябрь (0.1°C/год). То есть в период вскрытия ледяного покрова на устьевом взморье рук. Быковского и образования там полыньи (в мае–июле) потепления воздушной среды не наблюдалось. По данным ААНИИ [17] об аномалиях средних месячных значений температуры воздуха, в апреле–июне 2008–2019 гг. в рассматриваемом районе моря Лаптевых значимых тенденций не выявлено, хотя средняя многолетняя температура воздуха в этот период была выше [8], чем в предыдущий климатический период (1961–1990 гг.). Согласно расчетам, значимых тенденций температуры воздуха во все сезоны года на в/п Кюсюр и пгт Тикси за 2008–2019 гг., как и за предыдущий 12-летний период (1993–2004 гг.), не обнаружено. В 1993–2019 гг. отмечалось два полных цикла солнечной активности (рис. 2а), 12.6 и 11.0 лет [5, 27], чем и объясняется отсутствие значимых тенденций температуры воздуха в 1993–2004 гг. и 2008–2019 гг. (рис. 2а). Изменчивость чисел Вольфа, показанная на рисунке 2а, с некоторым запаздыванием обуславливала колебания температуры воздуха на метеостанции пгт Тикси, в противофа-



**Рис. 2.** Изменчивость чисел Вольфа ( $W$ ), средней за зиму температуры воздуха на метеостанции Тикси ( $T_a$ , зим) и средней за май – август солёности воды ( $S$ ) на устьевом взморье (а), средней месячной температуры воздуха в мае ( $T_a$ ), ДНП в рук. Быковском и ДОП на его устьевом взморье, в сутках от 01.05 (б).

зе к которым изменялась солёность воды устьевого взморья (а, следовательно, и сток р. Лены).

В работах [8, 14, 22, 25] указано, что в последнее 30-летие, по сравнению с предшествующим климатическим периодом, изменились характеристики ледового режима р. Лены и моря Лаптевых: сократилась продолжительность ледостава, периода с ледовыми явлениями, уменьшилась толщина льда и ледовитость. В 1993–2019 гг. на устьевом взморье рук. Быковского толщина льда в мае не изменялась, а в июне в среднем уменьшалась на 2 см/год, вероятно, из-за увеличения стока тепла реки, так как тенденций температуры воздуха в эти месяцы не было. Даты начала образования полыньи в 30-километровой прибрежной зоне взморья, в области повышенного влияния стока рук. Быковского, становились более ранними на 1.3 сут/год. Мористее тенденции не были статистически значимыми. Также в мае–августе не обнаружено значимых тенденций СПЛ и толщины льда. В периоды 1993–2004 гг. и 2008–2019 гг. ледовые условия стабилизировались, рассмотренные характеристики ледового режима тенденций не имели, что обусловлено отсутствием значимых тенденций температуры воздуха (рис. 2а) и соответствует выводам работ [21, 23] о неизменности ледовых условий плавания в море Лаптевых в 1997–2018 гг.

В 1993–2019 гг. (по сравнению с 1961–1990 гг.) увеличился средний годовой сток воды и тепла р. Лены. По приближенным оценкам, сток тепла увеличился почти на 10%, что согласуется с данными работ [13, 15]. Эти изменения, возможно, связаны с потеплением климата на материке [8], в бассейне реки. Однако при сравнении средних месячных значений уровня воды на п/с Хабаровова за 1951–1965 гг. (до сооружения Вилюйского водохранилища) и за 2008–2019 гг. оказалось, что годовой ход уровня воды (а, следовательно, и расхода воды) существенно изменился: с ноября по апрель уровень повысился на 40–50%, а в мае – на 150%. В остальные месяцы его изменения были в пределах  $\pm 10$ –15%. Согласно работе [15], сток р. Лены в зимний период 1988–2017 гг. увеличился на 50% по сравнению с базовым, что совпадает с полученными оценками изменения уровня воды. Возможно, сооружение крупного водохранилища на притоке, р. Вилюй, могло привести к внутригодовому перераспределению стока воды и тепла в низовье р. Лены. Хотя в работах [13, 22] выявленные аналогичные изменения, в основном, обосновываются климатическими факторами. Отсутствие значимых тенденций среднего годового и сезонного стоков воды и тепла р. Лены на в/п Кюсюр, а также дат начала и пика половодья в последний 12-летний период свидетельству-

ет от стационарности гидрологических процессов в 2008–2019 гг.

Из-за отсутствия данных о стоке и уровне воды р. Лены в 1993–2007 гг., о возможных тенденциях этих характеристик можно судить лишь косвенно, например, по изменчивости солености воды на устьевом взморье рук. Быковского (рис. 2а). В 1993–2019 гг. и в оба 12-летних периода значимых тенденций солености воды не выявлено. Но более раннее (на 1.3 сут/год) образование полыньи на устьевом взморье рук. Быковского и отмеченные здесь положительные аномалии температуры воды [12], вероятно, подтверждают вывод о наличии положительных тенденций стока тепла, поступавшего в 1993–2019 гг. на устьевое взморье зимой и весной, что связано с внутригодовыми изменениями этих характеристик в указанные сезоны года и увеличением температуры речной воды из-за потепления климата в бассейне р. Лены. При этом в более холодные зимы весенне-летний сток р. Лены был меньше, а соленость устьевого взморья – больше; в теплые зимы, наоборот, сток реки был больше, а соленость устьевого взморья меньше (рис. 2а).

Результаты анализа изменчивости режимных характеристик согласуются с материалами [8] за 2005–2020 гг. и данными [17] за 2007–2022 гг., а также с выводами работ [10, 11, 13, 14, 16, 21, 22, 24, 25] об изменении климата и стока рек в арктическом регионе России в различные климатические периоды (1960–1990 гг. и 1991–1921 гг.), и свидетельствуют о том, что эти изменения происходили и в устье р. Лены, включающем ее устьевую часть и устьевое взморье. Но в последнее 12-летие они были незначимы.

Из рис. 2б очевидно отсутствие тенденций характеристик температурного, водного и ледового режимов в устьевой области р. Лены в период 2008–2019 гг. Совместный анализ изменчивости температуры воздуха ( $T_a$ ) в мае и июне на метеостанциях в пгт Тикси и с. Кюсюр, ДОП на устьевом взморье рук. Быковского в пределах 50-мильной прибрежной зоны и ДНП в вершине дельты р. Лены (на водпосту п/с Хабарова) показал, что изменения рассматриваемых режимных характеристик как реки, так и ее устьевого взморья синфазны. При этом колебания  $T_a$  происходили в противофазе колебаниям ДОП и ДНП (рис. 2б).

Таким образом, установлено, что в последнем, почти 30-летнем климатическом периоде (1993–2019 гг.), выделяются два однородных цикла (рис. 2а): 1993–2004 гг. (более холодный) и 2008–2019 гг. (более теплый). Анализ изменчивости температуры воздуха, СПЛ, толщины льда, ССР

полыньи и солености воды показал, что в эти периоды значимых тенденций указанных характеристик не отмечалось. По-видимому, в рассматриваемом районе климатические изменения имеют цикличность 11–12 лет (декадные возмущения [5]), которая обусловлена астрономическими и гелиофизическими факторами [5, 23] на фоне глобальных климатических осцилляций [5] и потепления климата (рис. 2).

**Роль основных факторов в образовании полыньи.** Образование Ленской полыньи – процесс многофакторный. Его особенности зависят от солнечной радиации и температуры воздуха, стока воды и тепла, уровня воды в реке и на устьевом взморье, ветра, волнения, толщины и плотности льда, солености и температуры воды, наличия снежниц на льду, приливо-отливных колебаний уровня воды, а также влияния на ледяной покров заприпайной полыньи. Комплексное воздействие этих факторов на эволюцию Ленской полыньи может быть значимым, особенно температуры воздуха и речного стока.

Влияние стока р. Лены на ледовые условия устьевого взморья рук. Быковского подтверждает меридиональное, а не широтное (характерное при влиянии на тепловые и ледовые процессы температуры воздуха) расположение средних многолетних изохрон устойчивого образования полыньи (рис. 3). Их вдольбереговое расположение, повторяющее распространение речной воды на взморье рукава, свидетельствует о том, что на процесс вскрытия и очищения взморья рук. Быковского преимущественно влияет его сток, а не продвижение на юг заприпайной полыньи с севера или фронта ледотаяния с юга.

Представленное на рис. 3 среднее многолетнее распределение изохрон устойчивого образования полыньи на взморье рук. Быковского согласуется с картой изохрон средних сроков разрушения припая в море Лаптевых, приведенной в работе [11] за 1980–2011 гг., и дает более полное представление о процессе очищения ото льда рассматриваемого участка Ленской полыньи при средних многолетних гидрометеорологических условиях в период 1993–2019 гг.

В широтном направлении от устья рук. Быковского даты образования полыньи становились более поздними (рис. 3). При этом в умеренные зимы (50%) в рассматриваемом районе взморья в среднем размах дат образования полыньи был равен 13 сут, в суровые (23%) – 21 сут, в мягкие (27%) – 6 сут. Средняя ошибка составляла  $\pm 1.5$  сут.

Для оценки вклада различных факторов в формирование полыньи на устьевом взморье рук. Быковского в 2008–2019 гг. и поиска возможных

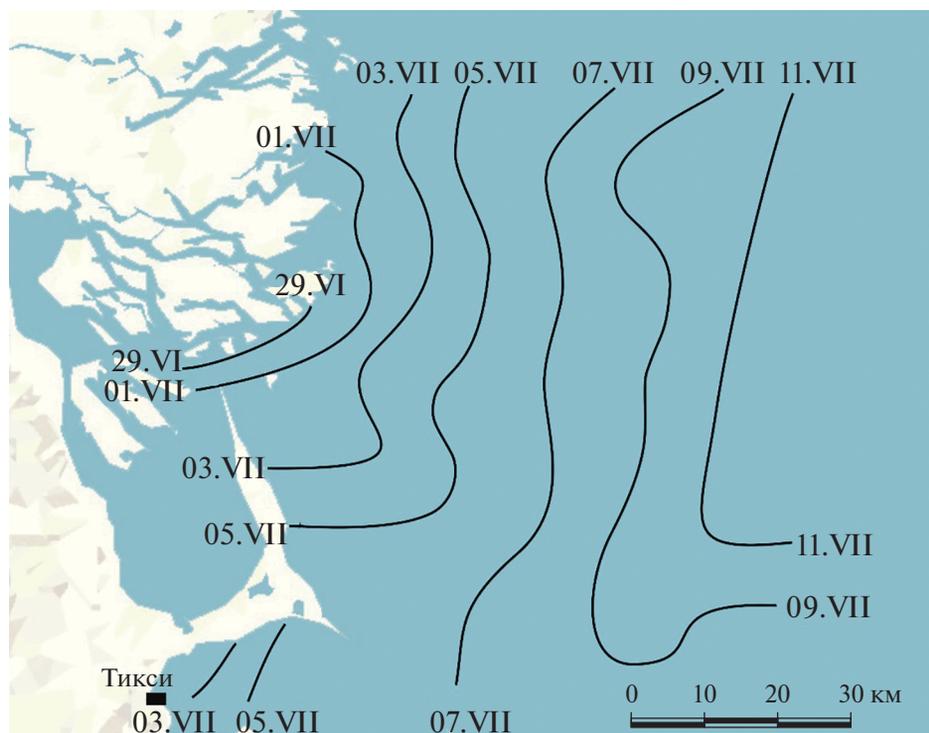


Рис. 3. Средние за период 1993–2019 гг. даты устойчивого образования полыни на устьевом взморье рук. Быковского.

предикторов для усовершенствования прогнозных разработок выполнен анализ зависимостей даты образования полыни от метеорологических (температуры воздуха в пгт Тикси) и гидрологических (даты начала половодья в рук. Быковском на п/с Хабарова) факторов.

Зависимости даты образования полыни от “суммы градусо-дней мороза” за ледовый сезон не выявлено, а зависимость ДОП от средней месячной температуры июня имеет коэффициент корреляции  $-0.60 \pm 0.05$ , что снижает эффективность ее использования в прогнозных целях. Еще менее тесная связь (коэффициент корреляции  $-0.34 \pm 0.07$ ) между датой образования полыни и средней месячной температурой воздуха – в мае. К тому же использование средней температуры воздуха в июне в качестве наиболее значимого предиктора для прогноза даты очищения ото льда устьевое взморье, как предлагается в работе [11], может обеспечить среднюю заблаговременность прогноза в пределах декады, так как в этом районе образование полыни в среднем отмечается с 29.06 по 11.07 (рис. 3).

Поскольку средние даты начала половодья в вершине дельты р. Лены фиксируются на 40–45 суток раньше средних дат образования полыни на устьевом взморье, не менее важными предикторами могут быть сток реки и сроки наступления основных фаз ее водного режима.

Анализ дат начала и пика половодья, а также ледовых явлений в устье р. Лены за 2008–2019 гг. показал, что в среднем через 20 суток после начала половодья в рук. Быковском (15.05) отмечался его пик (05.06). Примерно в эти же сроки начинался ледоход в вершине рукава, который в среднем продолжался 4–6 суток, сопровождался заторами льда, и к 10.06 этот водоток очищался ото льда. При подвижках, ледоходе и прорыве заторов, которые наблюдались на участке Кюсюр–Хабарова почти ежегодно, происходили навалы льда на берега рукавов, лед накапливался в поймах, где постепенно таял [13]. В среднем только через 18 суток после исчезновения льда в рук. Быковском начинало очищаться его устьевое взморье, то есть через 22 суток после прохождения по рукаву пика половодья. По-видимому, выносу льда из реки на устьевое взморье препятствовал припай. Лишь в 25% случаев очищение ото льда рук. Быковского и прилегающей части его взморья происходило практически одновременно, обычно в многоводные и теплые годы. Эти результаты согласуются с данными работы [11] о длительности (1–1.5 мес.) процесса вскрытия припая и очищения ото льда южной части моря Лаптевых.

По многолетним данным авиаразведок [2], в весенне-летний период выноса речного льда из рукавов на устьевое взморье не наблюдалось. Из

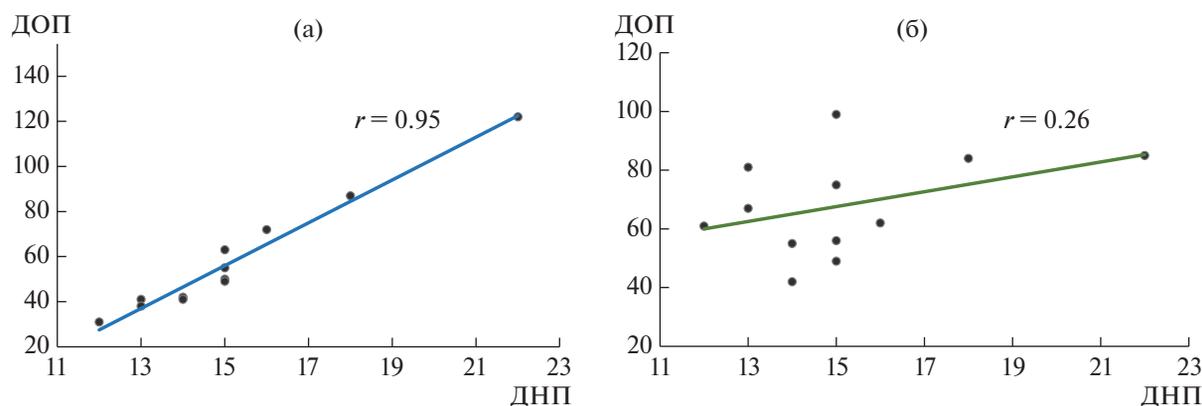


Рис. 4. Зависимость ДОП от ДНП в рук. Быковском у п/с Хабарова в 30 (а) и в 100 км (б) от берега в 2008–2019 гг.

этой работы следует, что динамическое и тепловое воздействие стока рук. Быковского на ледяной покров устьевого взморья проявлялось, в основном, в его постепенном размывании и протавивании снизу в течение 1.5–2 месяцев, что уменьшало толщину льда, облегчая его вскрытие. Действительно, интенсивность стаивания льда с его нижней поверхности, в зависимости от скорости течения, может достигать 3–4 см/сут [9]. С учетом значительного увеличения стока тепла зимой [13], это представляется возможным. Но, кроме динамического и теплового влияния на лед, способствующего вскрытию и очищению ото льда, сток опресняет устьево взморье, что оказывает обратное воздействие на ледяной покров [20].

При повышенном стоке половодья вскрытие ото льда устьевого взморья происходило рано (в мае) и быстро, в течение 1–3 суток. Также быстро полынья замерзала. Потому что пресная вода, попадая в зону переохлажденной (до  $-1.8^{\circ}\text{C}$ ) воды устьевого взморья (особенно при отливе после прилива) быстро замерзала, так как скорость кристаллизации у нее больше, чем у соленой воды, и температура замерзания выше. Подледное опреснение увеличивало как ледовитость, так и толщину льда с его нижней границы [20]. Тем самым процесс образования полыньи замедлялся.

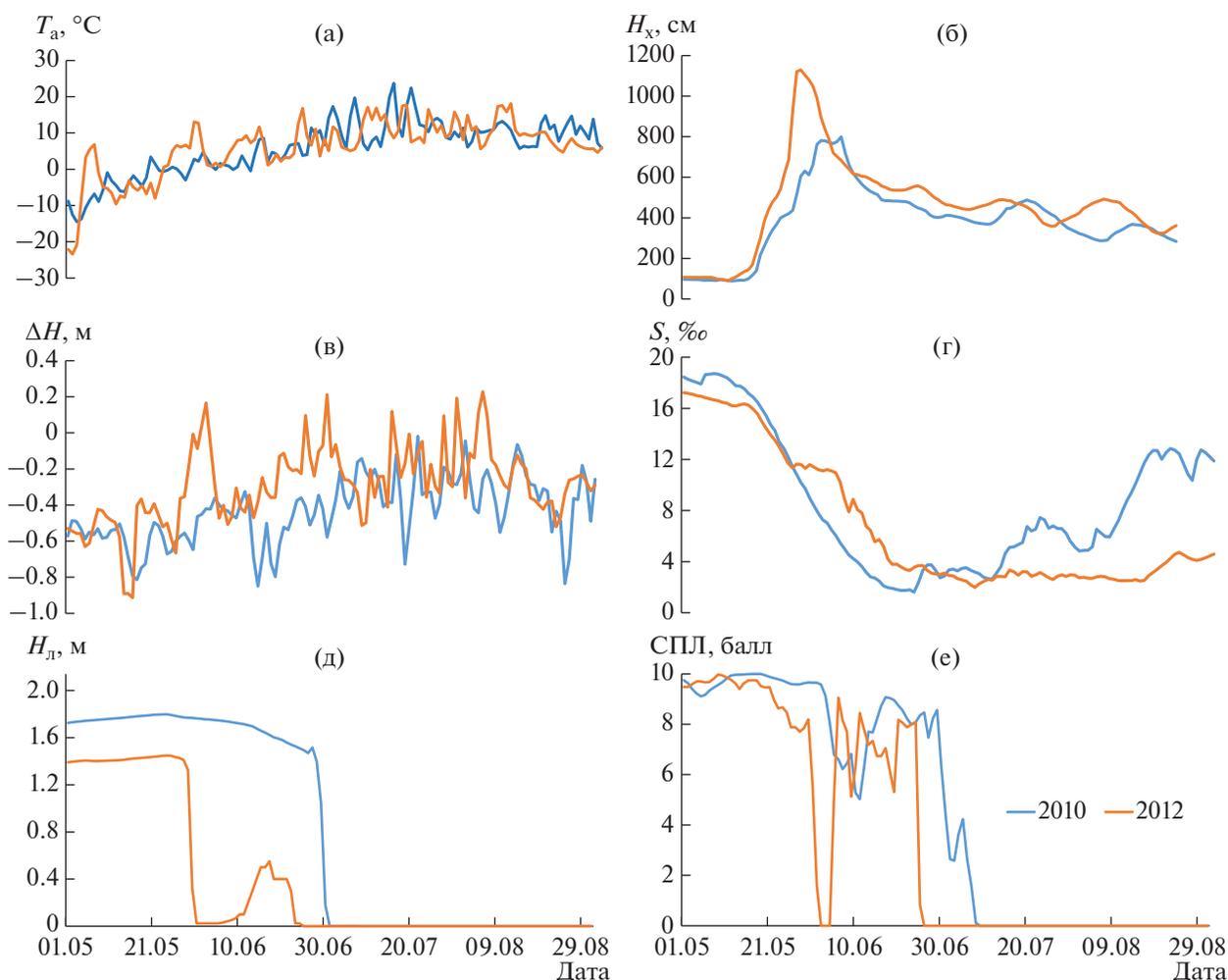
Учесть весь комплекс разнонаправленных факторов, обуславливающих формирование и развитие Ленской полыньи на участке устьевого взморья рук. Быковского, пока сложно. Вклад речного стока в этот процесс оценивался по влиянию сроков начала половодья в рукаве на сроки образования полыньи на его взморье и, тем самым, на среднюю скорость ее роста. Использование даты начала половодья в устье р. Лены в качестве предиктора для прогноза даты очище-

ния ото льда ее устьевого взморья может повысить среднюю заблаговременность прогноза на месяц.

Пример такой зависимости приведен на рис. 4 для периода 2008–2019 гг. Более ранний период не использовался из-за отсутствия данных о стоке р. Лены. Здесь даты образования полыньи и даты начала половодья отсчитывались в сутках от 01.05 и рассмотрены для двух участков устьевого взморья рук. Быковского, удаленных от его устья на разные расстояния.

Из рис. 4 видно, что зависимость между ДОП на устьевом взморье рук. Быковского (рис. 1) и ДНП у п/с Хабарова в пределах 30-километровой зоны устьевого взморья (рис. 4а) более тесная ( $r = 0.95 \pm 0.03$ ) и статистически значима на уровне 0.05. А на расстоянии 100 км от берега, по направлению к морю, коэффициент корреляции уменьшается в 3.7 раза (рис. 4б). Очевидно, фронт образования полыньи распространяется по направлению выноса воды и тепла из рук. Быковского (рис. 3), и комплексное влияние стока р. Лены на сроки образования полыньи на ее устьевом взморье в основном проявляется в 50-мильной зоне (рис. 4), где изохроны дат образования полыньи располагаются параллельно берегу (рис. 3). По мере удаления от устья рукава роль речного стока в эволюции полыньи уменьшается и возрастает влияние радиационных и морских факторов.

Колебания уровня воды на устьевом взморье р. Лены весной и летом достигали 0.5 м. Они вызывали подвижки льда, возникновение закраин и трещин в припае, которые в дальнейшем способствовали образованию полыньи. После вскрытия под действием течений и ветра, особенно сгонного, скоростью 10–20 м/с и более плавучий лед выносился за пределы взморья, преимущественно в восточном и юго-восточном направлениях, со скоростью от 0.05 (на морской границе взморья)



**Рис. 5.** Изменчивость средних суточных значений температуры воздуха на метеостанции Тикси (а), уровня воды на п/с Хабарова (б), отклонений уровня воды от геоида (в), солёности воды (г), толщины льда (д) и СПЛ (е) с мая по август в 2010 и 2012 гг. на устьевом взморье рук. Быковского.

до 0.4 м/с (вблизи устья рук. Быковского). Однако дифференцировать влияние стока и ветра на образование полыньи пока не удалось.

**Особенности изменчивости СПЛ.** Для оценки роли стока р. Лены в изменчивости степени покрытия льдом акватории устьевое взморье рук. Быковского рассматривались средние суточные значения температуры воздуха, уровня и солёности воды, толщины льда и СПЛ в период образования полыньи (с 01.05 по 31.08) в 2008–2019 гг. Чтобы из комплексного влияния гидрометеорологических факторов на образование полыньи выделить вклад стока реки, из имеющегося ряда лет выбрано два года — маловодный 2010 г. и многоводный 2012 г. В эти разные по водоносности р. Лены годы метеорологические характеристики всех сезонов были близкими к средним многолетним значениям, что и позволило продемонстрировать

масштабы влияния речного стока на ледовые условия устьевое взморье.

В качестве примера на рис. 5 приведены изменения указанных характеристик для станции с координатами 71.67° с.ш. и 130.08° в.д. (выделена красным цветом на рис. 1), расположенной на устьевом взморье рук. Быковского, в зоне влияния стока реки. В представленные на рис. 5 годы, 2010 и 2012, средние метеорологические характеристики (температура воздуха, ветровой режим на метеостанциях Кюсюр и Тикси) и состояние заприпайной полыньи во все сезоны соответствующих лет были близки между собой (рис. 5а). Но в 2010 г. сток р. Лены на в/п Кюсюр был на 2% меньше нормы, а в 2012 г. он превысил норму примерно на 20% (рис. 5б).

В среднем, за период 2008–2019 гг., максимальный сток рук. Быковского отмечался на 5 сут

раньше максимального уровня воды на п/с Хабарова. Сдвигка во времени между наступлением максимума уровня воды в рук. Быковском и уровня воды на устьевом взморье видна из рис. 5б и 5в, она составила 6 сут в 2010 г. и 4 сут в 2012 г. Средняя скорость течения в рук. Быковском при этом была равна 0.2 и 0.3 м/с соответственно. Так как в устьевых рукавах р. Лены происходит распластывание волны половодья и вода затопливает обширные плавни [13], существенного подъема уровня воды и увеличения скорости течения на устьевом взморье в период повышенного стока реки не отмечалось. Поэтому, хотя уровень воды на п/с Хабарова на пике половодья в 2012 г. был на 3.3 м выше, чем в 2010 г., уровень устьевого взморья был выше всего на 0.1 м (рис. 5в). Воздействие стока на лед взморья носит интегральный, за весь ледовый сезон, характер. Его влияние во время образования полыньи иллюстрирует рис. 5г, из которого видно, что больший сток половодья в 2012 г. (по сравнению с 2010 г. и средним многолетним значением) понизил соленость устьевого взморья в среднем на 2‰. Очевидно, и воздействие стоковых течений на лед в 2012 г. было несколько больше, чем в 2010 г. В многоводный 2012 г. толщина льда на устьевом взморье в период наибольшего развития была меньше на 0.4 м (рис. 5д), несмотря на одинаковые метеорологические условия предзимья и зимы в 2010 и 2012 гг. (средняя месячная температура воздуха отличалась в пределах  $\pm 2\%$ ). В рассматриваемой точке (рис. 1) в 2012 г. из-за более раннего и многоводного половодья полынья начала формироваться на месяц раньше, чем в среднем по водности 2010 г. (рис. 5е). Из рисунков 5д и 5е видно, что, независимо от водоносности года и толщины льда, процесс вскрытия и образования полыньи вблизи устья рук. Быковского происходил быстро, в течение 1–5 сут. Но это наблюдалось позже (рис. 5б) прохождения пика половодья в рукавах на 24 сут (2010 г.) и на 4 сут (2012 г.), так как сток оказывал накопительный термогидродинамический эффект на ледяной покров и его толщину в течение всего зимнего сезона, а не только в половодье (рис. 5).

Поэтому вполне обоснованно использование даты начала или пика половодья в качестве предиктора для прогноза даты очищения ото льда устьевого взморья рук. Быковского (рис. 4, 5). При этом повысить качество связи между этими характеристиками можно путем учета не только температуры воздуха, но и стока воды или тепла, так как чем он больше и раньше наблюдается его максимум, тем раньше начинает формироваться полынья. Дополнительно при разработке прогноза также можно оценить влияние заприпайной полыньи и других, ранее перечисленных, факторов.

**Связь даты образования полыньи с ее ССР.** В то же время, в рассматриваемые 2010 и 2012 годы сроки начала формирования полыньи на устьевом взморье влияли на продолжительность процесса его очищения ото льда. При этом ветровой режим в эти годы был одинаков, средняя скорость ветра – около 3 м/с. Анализ карт распределения льда [17] и данных реанализа [26] показал, что в 2010 г. уменьшение СПЛ устьевого взморья рук. Быковского началось 01.07 и закончилось в первой декаде июля. В этот период в рассматриваемом районе устья образование полыньи продолжалось 9 сут, со средней скоростью 8.3 км/сут. Средняя температура воздуха в третью декаду июня, предшествующую процессу образования полыньи, составляла 9°C, похолоданий не отмечалось. А в многоводном 2012 г., по данным [17, 26], полынья начала образовываться 31.05, при средней декадной температуре воздуха 3°C и краткосрочном потеплении. Но в ночное время отмечались похолодания до минус 14.5°C. Поэтому быстрое вскрытие и образование полыньи на участке взморья, под действием стока реки в 2012 г., сменилось ее замерзанием. После вторичного образования полыньи полное очищение ото льда акватории произошло в конце июня, а по данным [17], еще 24.07.2012 на участке отмечался лед сплоченностью до 10 баллов, т.е. процесс роста полыньи растянулся во времени как минимум на месяц. Поэтому ССР полыньи в 2012 г. составляла 2.8 км/сут.

Более раннее образование полыньи, хотя и замедляет скорость ее роста, могло оказывать влияние на размеры полыньи летом, так как нилас и молодой лед, образовавшиеся в ней из-за увеличения теплоотдачи в атмосферу при похолодании и из-за опресняющего эффекта стока реки на взморье [20], в период нагрева легче поддавались таянию и разрушению, чем окружающий полынью припай. Чем больше была площадь полыньи летом, тем больше она выделяла тепла в атмосферу в период охлаждения и замерзания, смягчая арктический климат в предзимье, тем самым продлевая сроки навигации в осенний сезон [25]. Это подтверждает и наличие значимых положительных тенденций температуры воздуха в августе – ноябре. Следовательно, даты образования Ленской полыньи летом и ее размеры также могли влиять на климат зимнего периода, как заприпайная полынья на ледовитость моря летом [19].

Для выяснения роли указанных разнонаправленных факторов, влияющих на среднюю скорость роста полыньи и ее размеры, рассмотрен 41 случай образования полыньи на взморье рук. Быковского в 1993–2019 гг. Полученная для створа с координатами 72.00° с.ш. и 129.08–131.25° в.д.

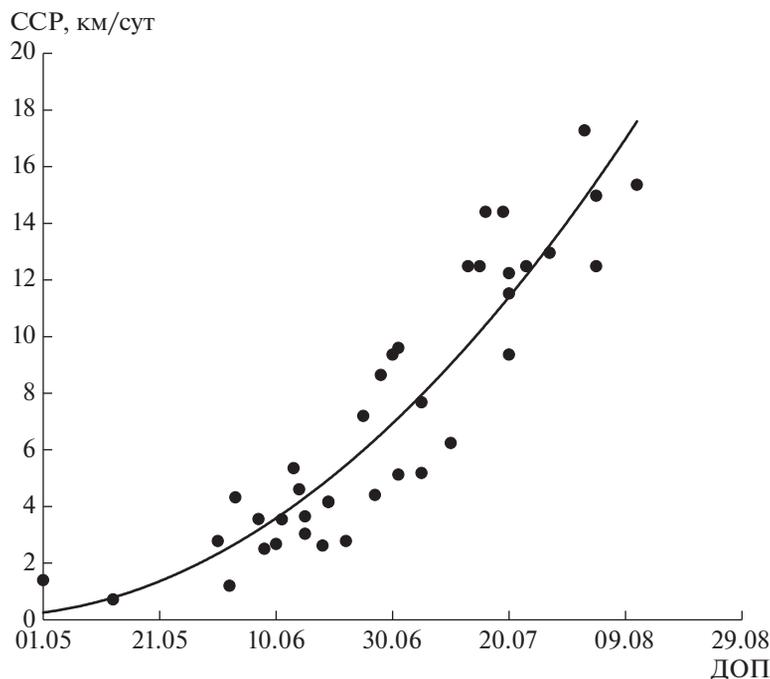


Рис. 6. Зависимость ССР (км/сут) от ДОП на взморье рукава Быковского в 1993–2019 гг.

(выделен красным цветом на рис. 1) зависимость ССР от даты образования полыньи представлена на рис. 6.

Статистически значимых тенденций ССР полыньи в 1993–2004 гг. и в 2008–2019 гг., а также в 1993–2019 гг. не обнаружено.

Коэффициент корреляции зависимости (рис. 6) равен  $0.92 \pm 0.06$ , доверительная вероятность — 95%. Разброс точек на рис. 6 обусловлен влиянием комплекса гидрометеорологических факторов, по-разному воздействующих на лед устьевого взморья в период вскрытия, очищения ото льда, а также в предшествующий образованию полыньи период. Хотя зависимость и подтверждает предположение о том, что при ранних датах образования полыньи ССР меньше, чем при поздних, она носит пока качественный характер, потому что разброс точек вокруг линии связи составляет в среднем  $\pm 4$  км/сут.

Зависимости размеров полыньи, образующейся летом на взморье рук. Быковского, от наличия ранее образовавшихся и вновь покрывшихся льдом полыней (24% рассмотренных случаев), а также от дат ее образования, не получено из-за недостаточной длины исходного расчетного ряда.

Установлено, что в средние по водности и температурным условиям годы ССР полыньи в створе рук. Быковского в среднем составляла 7.5 км/сут ( $\pm 10\%$ ), а на всем его взморье — 5.8 км/сут. При повышенном стоке реки и раннем вскрытии ле-

дяного покрова (при отрицательных температурах воздуха) ССР полыньи была около 2 км/сут. Минимальная ССР за 1993–2019 гг., 0.7 км/сут, отмечалась в многоводном 2014 г., когда вскрытие припая на взморье и образование полыньи началось в середине мая, при средней месячной температуре воздуха минус  $3.9^\circ\text{C}$ . В маловодные годы, когда вскрытие и образование полыньи приходились на более поздние сроки, ее ССР в среднем составляла 14 км/сут. Так, в маловодный 2004 г. отмечалась наибольшая ССР, 17.3 км/сут, поскольку припай начал вскрываться только в середине августа при средней температуре воздуха  $7.2^\circ\text{C}$ , что и привело к быстрому увеличению размеров полыньи.

Значительные скорости роста Ленской полыньи летом способствуют увеличению акваторий, свободных ото льда, и теплосодержания деятельного слоя моря Лаптевых. И чем больше размеры образующейся полыньи, тем большее влияние на климат она может оказывать, поглощая больше тепловой радиации в период нагрева и излучая тепло в атмосферу в период охлаждения. Таким образом, полынья, образующаяся летом на устьевом взморье, является еще одним, кроме заприпайной Ленской полыньи, существующей зимой [19], регулятором климатических изменений в системе суша—море.

При потеплении воздуха в апреле—марте и повышении стока реки в мае—июне даты образова-

ния полыньи на устьевом взморье реки становились более ранними и приходились на май и начало июня. В этот период потепления днем сменялись похолоданиями в ночное время, а иногда значенная средняя суточная и средняя месячная температуры воздуха были отрицательными (например, в мае). Поэтому рано образовавшаяся полынья становилась источником шуго- и ледообразования, уменьшалась скорость ее роста и после быстрого замерзания снижалось влияние водной среды на атмосферу. В холодные зимы и весны, при низком стоке реки, отмечалось более позднее образование полыньи на устьевом взморье – в разгар летнего периода (июль–август), что способствовало более быстрому ее росту и отепляющему влиянию на климатические условия предзимья. В этом случае даты ледообразования отмечались позже средних многолетних значений, что приводило к формированию ледяного покрова в сроки, когда температура воздуха устойчиво была отрицательной, а сток реки минимальным, поэтому замерзание, образование припая и нарастание толщины льда происходили быстро [17]. Увеличение стока реки зимой [13, 22] способствовало, с одной стороны, росту толщины припая, так как пресная вода, изолированная ледяным покровом от ветрового воздействия и слоем скачка плотности от перемешивания с более соленой водой взморья, распространяясь подо льдом на значительные расстояния, примерзала к нижней поверхности льда, увеличивая его толщину и прочность [20]. С другой стороны, при увеличении скорости течения и стока тепла, особенно в половодье, сток, оказывая динамическое и тепловое воздействие, способствовал уменьшению толщины льда, его вскрытию и очищению акватории ото льда. Такое взаимодействие между сушей, рекой, морем, льдом и атмосферой, по-видимому, и приводило к стабилизации и отсутствию значимых тенденций характеристик гидрометеорологического режима устьевых взморья рек. Быковского р. Лены в 1993–2004 гг. и 2008–2019 гг.

#### 4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детализация многофакторного процесса образования полыньи летом на устьевом взморье рек. Быковского р. Лены впервые сделана на основе ежесуточных данных реанализа [26], что дает преимущество по сравнению с использованием материалов спутниковых и авианаблюдений, дискретность которых значительно меньше. Эти данные, в комплексе с материалами анализа ледовых условий, сделанного в АНИИ [17], и результатами наблюдений Росгидромета [1, 4, 6, 8], позволили с большей степенью достоверности опреде-

лить сроки образования полыньи и расширить знания о недостаточно изученном процессе вскрытия и очищения ото льда рассматриваемой части устьевых взморья р. Лены под действием стока реки в весенне-летний период.

Выявленные положительные тенденции средней температуры воздуха в марте, апреле ( $0.2^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), августе–ноябре ( $0.1^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), толщины льда в июне ( $2\text{ см}/\text{год}$ ), даты образования полыньи в зоне влияния стока р. Лены (они стали более ранними на  $1.3\text{ сут}/\text{год}$ ) за 1993–2019 гг. согласуются с выводами авторов работ [10, 13, 21, 22, 24] об отмечавшемся в 1991–2021 гг. потеплении климата арктического региона, который, по сравнению с предыдущим 30-летним климатическим периодом, стал более теплым. Внутри рассматриваемого периода выделено два цикла стабилизации водного, температурного и ледового режимов – 1993–2004 гг. и 2008–2019 гг., которые ранее не обнаруживались.

Отсутствие значимых тенденций указанных характеристик в рассматриваемой части устья р. Лены в 1993–2004 гг. и в 2008–2019 гг. свидетельствует о взаимосвязи, взаимовлиянии и сбалансированности климатических процессов в атмосфере, на суше и в океане [5, 23], что наиболее ярко выражено на границе суша–море, а также о короткопериодных (11–12 лет) колебаниях гелиофизического генезиса в изменчивости климата [23] на фоне современного замедления процесса потепления [5, 14, 17, 23, 25]. Очевидно, образование полыней в арктических морях – это циклический процесс, развивающийся как отклик на глобальные климатические изменения, и он является одним из факторов саморегулирующейся системы суша–океан–атмосфера, тепловой баланс которой стремится к нулю [5]. Поэтому исследование полыней на устьевых взморьях рек, подверженных влиянию бассейновых факторов, позволяет более правильно выбрать предиктор (наиболее перспективным из которых представляется сток тепла) для усовершенствования прогнозных разработок, которые ранее ориентировались только на метеорологические условия.

Анализ изменчивости ледовитости (СПЛ) устьевых взморья р. Лены показал ее неоднородность в пространстве и во времени. Установлено, что в июне–августе на устьевом взморье р. Лены существуют два центра очищения ото льда. Один центр образуется на месте Ленской заприпайной полыньи, которая существовала в северной части устьевых взморья в декабре–апреле с вероятностью 83%. В летний период, в июне–августе, с повторяемостью 23% этот центр очищения ото льда влияет на формирование полыньи (вероятность

образования которой – 100%) на устьевых взморьях Трофимовского и Быковского рукавов.

Впервые рассмотренные особенности эволюции Ленской полыньи на устьевом взморье рук. Быковского в летний период позволили выявить закономерности изменчивости сроков ее образования и речного стока. Полученные связи дат образования полыньи на устьевом взморье, в пределах влияния стока реки, от дат начала половодья в вершине дельты р. Лены (п/с Хабарова) имеют высокие коэффициенты корреляции (0.82–0.95) и уровень статистической достоверности (95%). Следовательно, имеется возможность использования даты начала половодья (или даты наступления его пика) в устье р. Лены в качестве предиктора для прогноза даты очищения ото льда устьевого взморья этой реки, что может повысить среднюю заблаговременность прогноза на месяц, а также эффективность планирования зимней навигации по Северному морскому пути.

Зависимость средней скорости роста полыньи от даты ее образования на взморье рук. Быковского в 1993–2019 гг. получена впервые и, хотя является приближенной, тоже может быть использована для усовершенствования методов прогноза ледовой обстановки в рассматриваемом районе. Так, при прочих равных условиях, изменение даты образования полыньи на  $\pm 1$  сутки в среднем может изменить ССР полыньи на  $\pm 0.20$  км/сут. Средняя скорость роста полыньи при ее раннем образовании, в мае – начале июня, обычно меньше, чем при позднем, потому что положительный баланс тепла достигает максимальных значений только в июле – августе. Средняя многолетняя ССР была значительной, 5.8–7.5 км/сут; в многоводный 2014 г. она составляла 0.7, а в маловодный 2004 г. – 17.3 км/сут.

Морской климат, в отличие от материкового, в силу инерционности водной среды, медленнее реагирует на любые климатические изменения. При сохранении тенденций к потеплению климата весной на материке, в бассейне р. Лены, и увеличении стока реки образование полыньи на устьевом взморье может отмечаться раньше (в мае), когда происходит нивелирование дневных потеплений воздуха ночными похолоданиями, либо ежесуточно превалирует отрицательная температура воздуха над морем. Тогда скорость роста полыньи будет уменьшаться, полынья может замерзать и не будет оказывать непосредственного влияния на климат летнего периода. Холодная весна, низкое половодье и позднее образование полыньи, при устойчивых положительных значениях температуры воздуха в июле – августе, будут способствовать увеличению скорости очищения ото льда больших акваторий, что

окажет утепляющий эффект на климат предзимья, улучшит навигационные условия осенью и сдвинет даты ледообразования на более поздние. Это приведет к интенсификации теплопотерь в атмосферу в период охлаждения и увеличению толщины льда, что ухудшит условия ледового плавания зимой. Таким образом, годовой и многолетний термодинамический баланс обменных процессов между сушей, рекой, морем и атмосферой будет стремиться к нулю, что и приведет к стабилизации характеристик гидрометеорологического режима устья.

Полученные результаты об отсутствии значимых тенденций рассматриваемых характеристик в 2008–2019 гг. и возможной стабилизации тепловых и ледовых процессов согласуются с выводами работы [23], в которой показано, что в 2012–2018 гг., несмотря на продолжающееся потепление климата Арктики, в морях ее Дальневосточного и Сибирского секторов (к которым относится и море Лаптевых) уменьшение ледовитости прекратилось. Это связано с потеплением климата северных районов Сибири и увеличением стока тепла рек в зимний период и половодье, вследствие которого образование полыней на устьевых взморьях стало отмечаться раньше перехода баланса тепла к положительным значениям. Поэтому рано образовавшиеся акватории, свободные ото льда, замерзали. Отсутствие значимых тенденций режимных характеристик на взморье рук. Быковского также является подтверждением того, что темпы потепления климата, очевидно, замедляются и, в перспективе, может начаться его похолодание [5].

Рассмотренные особенности и тенденции формирования Ленской полыньи летом на участке рук. Быковского, а также выявленные закономерности могут быть справедливы для устьевых взморьев остальных, менее многоводных, рек бассейна моря Лаптевых, что можно использовать для прогноза изменения степени покрытия льдом судоходного маршрута в южной части моря. Очевидно, более поздние сроки образования Ленской полыньи в районе Северного морского пути (например, в августе) могли бы способствовать продлению навигации в осенний период, а более ранние (в мае) – в весенний.

Научные разработки по данной тематике представляются своевременными и перспективными, поскольку направлены на реализацию программы развития навигации по Северному морскому пути и новой Морской доктрины Российской Федерации, необходимых для обеспечения хозяйственной деятельности в арктических регионах страны, устойчивого функционирования их экономики и безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации Федеральное агентство водных ресурсов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505>.
2. *Агафонова С.Я.* Исследования ледового режима рек Арктической зоны России в XX и XXI вв. // Арктика и Антарктика. 2019. № 1. С. 81–94. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2019.1.29530>  
URL:[https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=29530](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29530).
3. *Большаинов Д.Ю., Макаров А.Я., Шнайдер В. и др.* Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
4. *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>.
5. *Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А.* О существенных различиях крупномасштабных изменений приземной температуры над океанами и материками // Океанология. 2006. Т. 46. № 2. С. 165–177.
6. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том II. Море Лаптевых. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 278 с.
7. ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения. Издание официальное. Госстандарт СССР. М.: Издательство стандартов, 1973. 34 с.
8. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с. ISBN 978-5-906099-58-7.
9. *Донченко Р.В.* Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
10. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
11. *Карклин В.П., Карелин И.Д., Юлин А.В.* Метод прогноза сроков окончательного разрушения припая в районах восточной части моря Лаптевых заблаговременностью до одного месяца // Информационный сборник. Гидрометцентр России. 2013. № 40. С. 97–114.
12. *Крайнева М.В., Малахова В.В., Голубева Е.Н.* Численное моделирование формирования аномалий температуры в море Лаптевых, обусловленных стоком реки Лены // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 6. С. 534–539.
13. *Магрицкий Д.В., Айбулатов Д.Н., Горелкин А.В.* Закономерности пространственно-временной изменчивости стока на предустьевом участке и в дельте р. Лены // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 1. С. 15–29.
14. *Мищенко А.В., Егоров А.Г.* Сроки устойчивого ледообразования в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском (1942–2018 гг.) // Труды ГОИН. 2020. № 221. С. 211–225.
15. Научно-прикладной справочник. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: ООО “РИАЛ”, 2021. 190 с.
16. *Никаноров А.М., Брызгалов В.А.* Реки России. Часть II. Реки Европейского Севера и Сибири. Ростов н/Д.: “НОК”, 2012. 296 с.
17. Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. Ежеквартальный информационный бюллетень, 2008–2019 гг. СПб: ААНИИ. Режим доступа: <http://old.aari.ru/misc/publicat/gmo.php>.
18. *Пановский Г.А., Брайер Г.В.* Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 209 с.
19. *Попов А.В., Карелин И.Д., Рубченя А.В.* Роль зимних запирающих полей в формировании ледовых и гидрометеорологических условий в морях Сибирского шельфа в летний период // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 65–73.
20. *Скриптунов Н.А.* Влияние речного стока на гидрологические процессы на устьевом взморье в ледовый период // Труды ГОИН. 1976. № 129. С. 5–36.
21. *Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И.* Изменчивость ледовых условий плавания по трассам Северного Морского пути за период 1997–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 328–340.
22. *Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др.* Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек российской Арктики // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 233–251.
23. *Холощев А.В., Подпорин С.А.* Меридиональные составляющие атмосферной циркуляции и ледяной покров Арктики в летние сезоны // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 34–42.
24. *Шалина Е.В.* Изменение ледовитости северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 67–78.
25. *Юлин А.В., Тимофеева А.Б., Павлова Е.А. и др.* Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости Российских арктических морей в современном климатическом периоде // Труды государственного океанографического института. 2019. № 220. С. 44–60.
26. Global Ocean Physics Reanalysis. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://resources.marine.copernicus.eu/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_REANALYSIS\\_PHY\\_001\\_030](http://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030).
27. Sunspot Index and Long-term Solar Observations. Режим доступа: <https://www.sidc.be/silso/ssngraphics>.

## Features of Formation of the Lena Polynya on the Estuarine Coast of the Bykovsky Arm in the Summer

R. Ya. Minkovskaya<sup>#, ##</sup>

*“Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences” (MHI), Sevastopol, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: rosmink@yandex.ru*

<sup>##</sup>*e-mail: rminkovskaya@mhi-ras.ru*

Based on the results of the global oceanic reanalysis (GLORYS12.v.1), materials of hydrometeorological observations of the Roshydromet network in the Laptev Sea and the mouth of the Lena River, reviews of the ice processes in the Arctic Ocean by the Arctic and Antarctic Research Institute, this paper considers the features of the evolution of the Lena Polynya on the estuarine coast of the Bykovsky Arm in the warm period 1993–2019. The relationship between the timing of the formation of a polynya on the seashore of this arm with the dates of the beginning of the flood at the top of the Lena River delta has been revealed. The assumption is confirmed that the average growth rate of the Lena polynya in summer is determined by the timing of its formation – the earlier the flood begins, the earlier the polynya forms on the coast of the Bykovsky arm and the smaller the average rate its growth. It has been established that the process of warming in the mouth area of the Lena in 2008–2019 stabilized, as there are no significant trends in the characteristics of water and ice regimes. These regularities may be invariant for other mouths of the rivers of the Laptev Sea basin, and the obtained dependences can be used to improve the forecast of the dates of cleansing of the water area at the estuary seashore of the Lena from ice and planning icebreaking navigation along the route Tiksi port–Lena River.

**Keywords:** Lena Polynya, estuarine coast of the Bykovsky Arm, date of the beginning of the flood, the average growth rate of the polynya