

УДК 551.461.2(268.5)

## ЗИМНЯЯ ПОЛЫНЯ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ И АРКТИЧЕСКАЯ ОСЦИЛЛЯЦИЯ В ПОСЛЕДНИЕ 300 ЛЕТ: РЕКОНСТРУКЦИИ ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2023 г. А. С. Астахов<sup>1,\*</sup>, В. В. Бабич<sup>2</sup>, А. Ю. Гуков<sup>3</sup>, А. В. Алаторцев<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Г.И. Долгих 02.03.2023 г.

Поступило 02.03.2023 г.

После доработки 23.03.2023 г.

Принято к публикации 28.03.2023 г.

Показано, что площадь зимней Сибирской полыни в море Лаптевых имеет отрицательную корреляцию с индексом арктической осцилляции (АО) для зимнего периода. Используя это, разработаны трансферная функция, связывающая вариации зимней полыни (временной ряд зимней АО) и геохимические временные ряды донных осадков, накопившихся за инструментальный период (1898–2018) в зоне распространения Ленской полыни. Установлено, что влияние зимней полыни на химический состав накапливающихся донных осадков реализуется через изменение редокс-условий придонных вод. Реконструкции с использованием разработанной трансферной функции распространения полыни через индекс арктической осцилляции для последних трех столетий показали, что активное развитие полыни увеличивает среднегодовую температуру воздуха на прилегающих акваториях, но разнонаправленно влияет на продолжительность безледного периода.

*Ключевые слова:* палеоклиматология, донные осадки, геохимия, зимняя полыня, арктическая осцилляция, море Лаптевых, трансполярный дрейф

DOI: 10.31857/S2686739723600406, EDN: RXTGLU

### ВВЕДЕНИЕ

Зимние заприпайные полыни Северного Ледовитого океана являются уникальным природным явлением и давно привлекают внимание исследователей. В связи с возникшей в последние годы возможностью круглогодичной навигации по Северному морскому пути необходимость их изучения становится еще более актуальной. Зимние полыни представляют пояс интенсивного ледообразования, могут продуцировать основную массу суммарного объема льдов, образующихся в отдельных морях за год [1, 2], обеспечивая постоянный трансполярный дрейф (ТД) арктических льдов. Помимо изменений ледовых условий зимние полыни влияют на температурно-солевой режим водной толщи, ее межсезонную динамику,

осолонение вод и развитие конвекции, а также из-за большой теплоотдачи в атмосферу, изменяют климат в прилегающих районах моря и побережья [1, 3, 4]. Площади заприпайных полыней подвержены значительным временным изменениям разного масштаба, в том числе межгодовым [2].

Для существования и развития зимней полыни необходимы возникновение и поддержание барической ситуации, обеспечивающей интенсивный отжимной ветровой дрейф льдов в течение достаточно длительного времени [3–5]. В море Лаптевых такие условия возникают при формировании в Арктике антициклонической барической системы, выделяемой Б.А. Крутских [6] как тип II. Позднее он был детализирован [7] и сопоставлен с отрицательной фазой арктической осцилляции (АО) [5, 8, 9]. Для этих условий характерны смещение к югу зоны западного атмосферного переноса [10, 11] и активизация межширотного атмосферного обмена [12]. При нахождении арктического минимума вблизи полюса или в море Бофорта, море Лаптевых оказывается в тылу антициклона. Соответственно, льды, образующиеся в полынях, выносятся на северо-запад и вовлекаются в трансполярный дрейф [5, 8, 13]. При циклонической барической циркуляции арктического бассейна, характерной для положи-

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Якутское управление по гидрометеорологии, пос. Тикси, Республика Саха (Якутия), Россия

\*E-mail: astakhov@poi.dvo.ru

тельной фазы АО, вдоль российского побережья преобладает атмосферный и океанический перенос в восточном направлении. При нем вынос льдов из моря Лаптевых затруднен, а основной поток ТД формируется ближе к американскому побережью [5, 9, 13].

Целью данной работы явилась опосредованная реконструкция развития зимней заприпайной полыни моря Лаптевых в последние столетия через индекс зимней АО, как параметра, наиболее полно отражающего барическую ситуацию Арктики в этот сезон. Использовалась ранее разработанная методика палеоклиматических реконструкций на основе сопоставления временных рядов гидрометеорологических наблюдений и геохимических временных рядов донных осадков, накопившихся за период наблюдений [14–16].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были использованы данные по химическому составу донных осадков колонки LV83-16-3, отобранной в центральной части моря Лаптевых (76°15.2 с.ш., 132°11.0 в.д., глубина моря 41 м). Она была специально выбрана как находящаяся в зоне развития Ленской заприпайной полыни (рис. 1). Ранее [15] методом рентгенофлюоресцентного сканирования с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) в ней через каждые 0.5 мм были определены содержания 20 химических элементов [15]. Возраст осадков и средняя скорость осадконакопления (0.7 мм/год) были получены по изотопам  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  с учетом результатов радиоуглеродного датирования [15]. По этим данным был построен погодичный временной геохимический ряд – каждому году прямым измерением или интерполяций присвоены содержания 20 химических элементов.

Для дальнейших построений, согласно ранее разработанной методике [14, 16], содержания химических элементов были преобразованы в безразмерные величины путем нормирования по рубидию: определено отношение содержания каждого элемента к содержанию рубидия. Эти данные были ранее опубликованы [15] и частично приведены на рис. 2. Нормированные по рубидию содержания каждого элемента были преобразованы в величины от 0 до 1 (нормирование минимакс). Для каждого элемента определялись максимальное (1) и минимальное (0) значения Эл/Rb, исходя из которых пересчитывались значения по всей длине колонки. Нормирование минимакс было использовано для получения возможности применения полученной трансферной функции при реконструкциях на основе данных по химическому составу осадков, полученных различными методами [16].

В качестве временного ряда гидрометеорологических наблюдений использован погодичный ряд определенных значений индекса зимней (декабрь–март) АО за 1898–2018 гг. из базы климатических данных открытого доступа (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

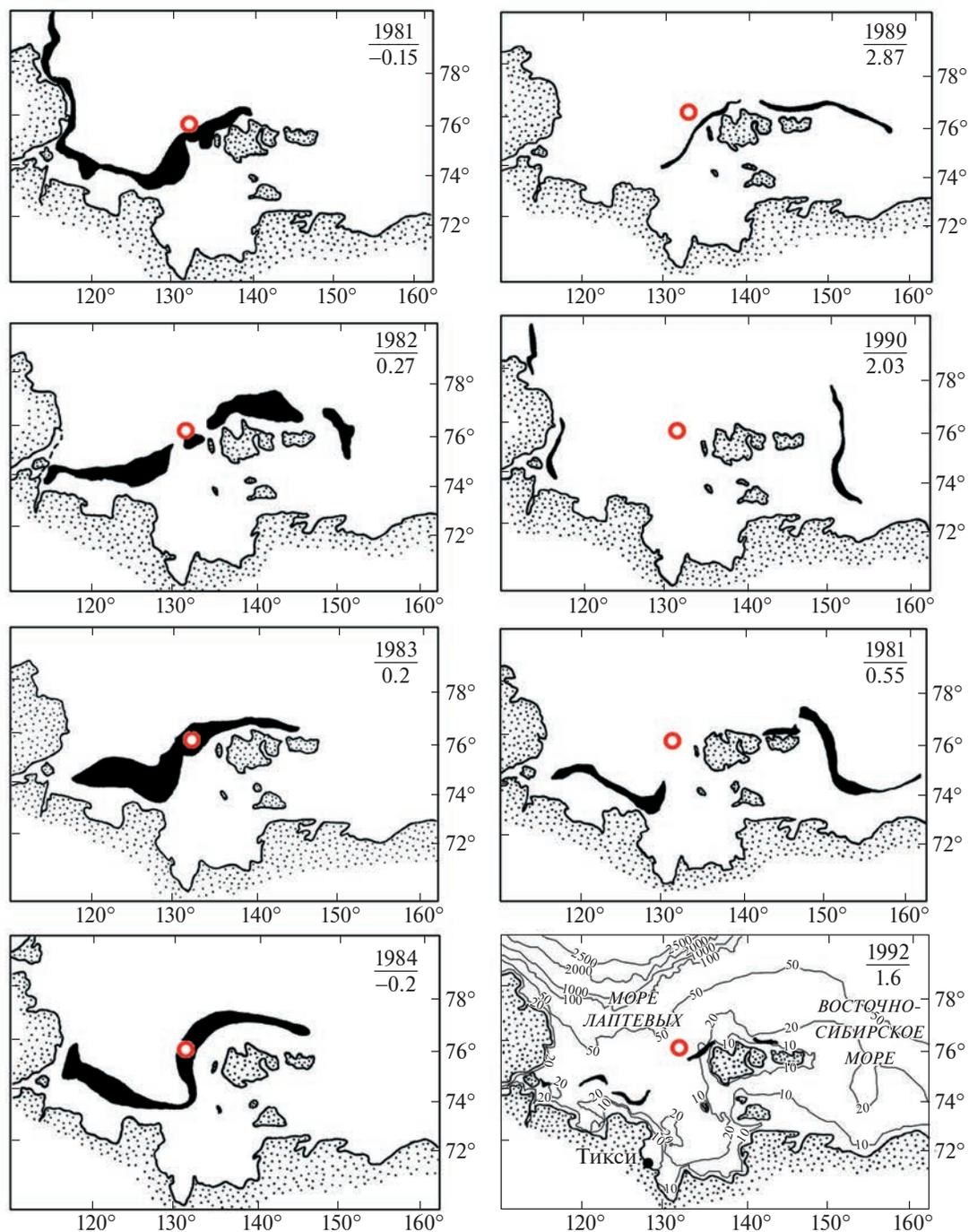
Для построения трансферной функции АО методами многомерной регрессии [14, 17] была создана матрица, включающая погодичный ряд наблюдаемых значений индекса зимней (декабрь–март) АО за 1898–2018 гг. и погодичные геохимические ряды нормированных по рубидию и минимакс содержаний химических элементов для этого же периода. Для минимизации влияния возможных погрешностей измерений и аномальных кратковременных событий все эти временные ряды были осреднены по 10-летним интервалам методом скользящей средней. Математический анализ матрицы проводился с использованием регрессионного, корреляционного, кросскорреляционного методов с минимизацией признаков в процессе построения регрессионной модели (трансферной функции) с использованием ранее разработанных дополнительных программ [17]. В трансферную функцию (ТФ), связывающую нормализованные содержания химических элементов и величину зимней АО, включили только элементы, чей вклад в величину АО превышает один процент:

$$\begin{aligned} \text{АО} = & 0.350\text{Mn/Rb}_m + 2.147\text{Cu/Rb}_m - \\ & - 0.330\text{K/Rb}_m - 0.578\text{V/Rb}_m - \\ & - 2.665\text{Ni/Rb}_m + 1.092, \end{aligned} \quad (1)$$

где:  $\text{El/Rb}_m$  – отношение содержания элемента к содержанию рубидия, нормированное по минимакс.

С использованием этой формулы значения АО были реконструированы для последних трех столетий на всю длину колонки (рис. 2). Для временного интервала 1898–2018 гг. коэффициент корреляции между наблюдаемыми и реконструированными значениями АО составил 0.88. Для оценки степени достоверности реконструкции рассчитывалась величина 95%-ной достоверности (0.35), показанная на диаграмме АО (рис. 2).

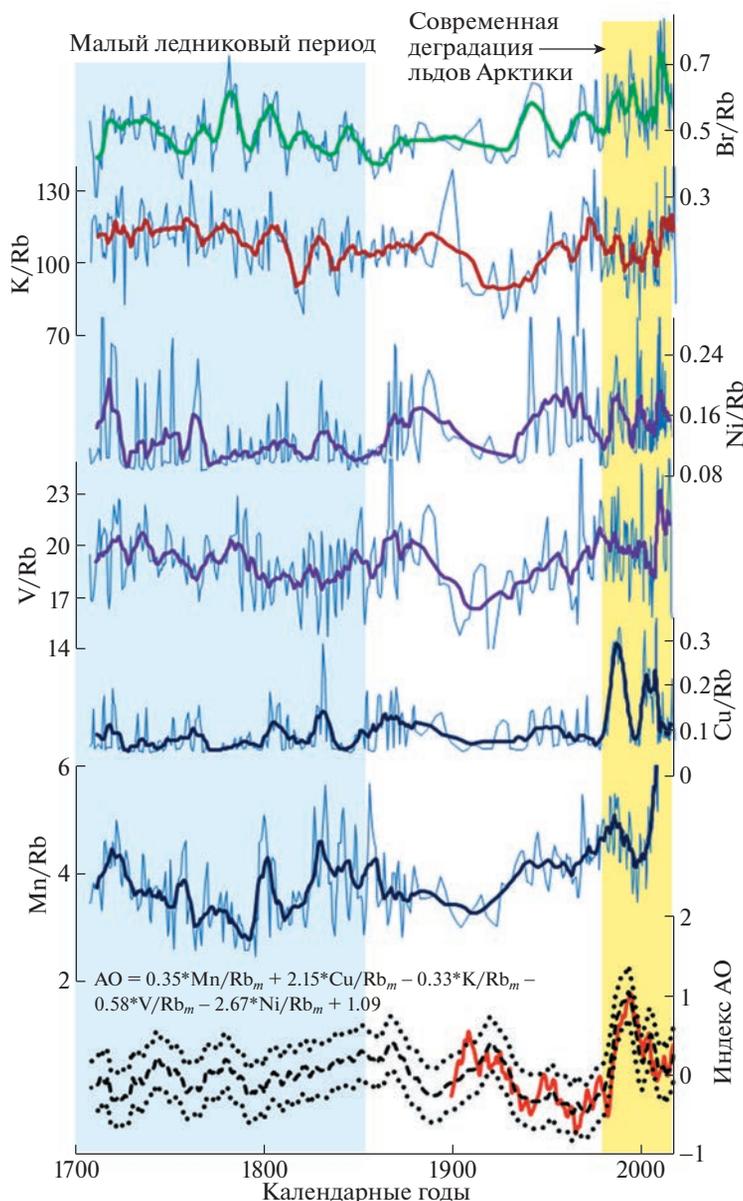
Так как для реконструкции АО была специально выбрана станция в зоне Ленской полыни, полученная ТФ может быть интерпретирована с позиций влияния последней на осадконакопление. Известна зависимость между развитием заприпайной полыней и типом атмосферной/океанической циркуляции (циклонической – антициклонической) в Арктике, в том числе отражаемой индексом АО [3–5, 7, 9]. К сожалению, специальные исследования распространенности (пло-



**Рис. 1.** Положение станции LV83-16 в сопоставлении с вариациями Сибирской полыньи в море Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского в марте (черная заливка) в годы с низкими (1981–1984) и высокими/положительными (1989–1992) значениями индекса АО [18]. Цифрами в верхнем правом углу показаны год/значение индекса зимней АО.

шадь, время существования) зимних полыней в зависимости от зимней АО, в том числе в море Лаптевых, ранее не проводились. Имеется точка зрения, что барическая ситуация, обеспечивающая отжимной ветровой дрейф льдов из моря Лаптевых, и, соответственно, развитие полыней, возникает преимущественно при низких значениях индекса АО [3, 5, 7, 9]. Проведенное нами

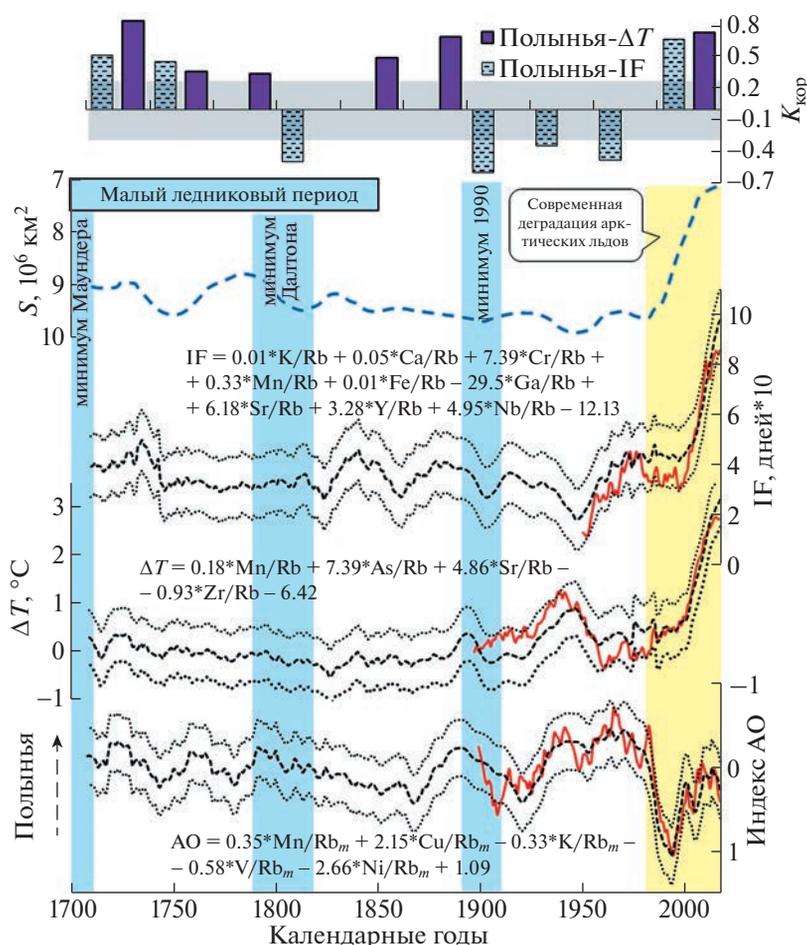
сопоставление развития полыней для серий лет с низким (1981–1984) и высокими (1989–1992) значениями АО (рис. 1) подтверждает это мнение. Основываясь на указанном, при дальнейшем обсуждении результатов используется положение, что активизация Ленской полыни, в районе которой находится изучаемая колонка, происходит в годы с низкими значениями индекса АО.



**Рис. 2.** Результаты реконструкции индекса арктической осцилляции для последних 300 лет по колонке LV83-16, вариации содержаний Br/Rb и химических элементов, использованных в трансферной функции. На диаграмме АО красной линией показаны измеренные значения индекса АО, штриховой – реконструированные, точечными линиями – границы 95%-ного доверительно интервала реконструкции.

В формулу (1) с отрицательным знаком входят редокс-чувствительные элементы аноксидных обстановок (V, Ni) и литогенный элемент калий. С положительным знаком входят редокс-чувствительные элементы оксидных обстановок – марганец и медь. Вхождение их в формулу можно рассматривать исходя из установившихся ранее закономерностей формирования ТФ для реконструкции продолжительности безледного периода (IF) и аномалий среднегодовой температуры (ΔТ) в этой точке [14, 15]. Набор элементов, входящих в формулу, свидетельствует, что основные различия в химическом составе накапливающихся

донных осадков, связанные с вариациями АО, определяются изменениями редокс-условий придонных вод. Аноксидность их усиливается в периоды с низкими значениями АО и, соответственно, с большей площадью зимней полыни. Такой механизм может реализоваться благодаря постоянному ледообразованию в зимних полынях с формированием сильно осолоненных вод, опускающихся в придонные горизонты и определяющих стратификацию вод на шельфе [3, 18]. В летне-осенний период стратификация еще более усиливается из-за прогрева поверхностных вод и поступления распресненных и теплых реч-



**Рис. 3.** Сопоставление реконструированной площади зимней польни и АО с продолжительностью безледного периода (IF), среднегодовой температурой воздуха ( $\Delta T$ ) [15] и площадью ледяного покрова Арктики в сентябре (S) [20] за последние 300 лет. Показаны только значимые величины ( $>0.3$  при  $n = 30$ ,  $q = 0.95$ ) коэффициента корреляции ( $K_{кор}$ ) между площадью польни, IF и  $\Delta T$ .

ных вод. В этих условиях после зимы с интенсивным развитием польни вертикальное перемешивание вод шельфа длительное время затруднено и в придонных водах образуется дефицит кислорода, что способствует накоплению в осадках редокс-чувствительных элементов аноксидных обстановок (в данном случае V, Ni) и обеднению осадков элементами оксидных обстановок (Mn, Cu). Наличие аноксидных обстановок в зимний и летний сезоны на этом участке шельфа, с содержанием кислорода в придонных водах менее 5.5 мл/л, подтверждено инструментальными измерениями [19].

Ограниченное перемешивание вод шельфа в годы с низкими индексами зимней АО и после них способствует также накоплению в осадках тонкозернистого материала, обогащенного глинистыми минералами и, соответственно, калием. Это определило вхождение в формулу (1) калия с отрицательным знаком. Характерно, что биогенные элементы (Ca, Sr, Br), которые на этой стан-

ции (рис. 3) и в других районах [14, 16], входят в трансферные функции IF и  $\Delta T$ , не вошли в формулу (1). Это указывает на незначительное влияние зимних польней на годовую первичную биопродуктивность из-за отсутствия солнечной радиации в это время.

Полученная реконструкция АО сопоставлена с выполненными ранее [14, 15] для этой колонки реконструкциями продолжительности безледного периода и среднегодовой температуры воздуха (рис. 3). На рис. 3 в качестве индикатора распространенности польни принято обратное значение индекса АО. Для сопоставления изменчивости вариаций площади польни с другими климатическими параметрами был выполнен корреляционный анализ распространения польни (-АО) с IF и  $\Delta T$  по тридцатилетним периодам. На рис. 3 показаны только значимые ( $>\pm 0.3$ ) величины этих коэффициентов. Из него следует, что вариации площади польни и продолжительности безледного периода за реконструированный период не

демонстрируют единую тенденцию. Существует мнение, что развитие полыней зимой приводит к уменьшению ледовитости в последующий летний сезон и, даже, в последующие сезоны [4]. Из рис. 3 следует, что возможна обратная корреляция, т.е. в годы с большей площадью зимней заприпайной полыни в море Лаптевых возможен короткий безледный период, а площадь арктических льдов в летний сезон увеличивается. Некоторыми исследователями это объясняется большим количеством новых льдов, продуцируемых полынями Арктики за зиму [1, 5].

Полыня и среднегодовая температура воздуха проявляют только положительную корреляцию в случае ее значимой величины (рис. 3). С одной стороны, это не противоречит существующему мнению о более высоких температурах в высокоширотных районах при отрицательной фазе АО из-за усиления субмеридионального переноса воздушных масс [8, 12]. Возможно, и наиболее вероятно следует из наших исследований, влияние полыни на температуру воздуха окружающих районов из-за контакта его с открытой морской поверхностью зимой или выделения тепла при ледообразовании [3, 8]. Синхронные изменения значения  $\Delta T$  и -АО, до, по крайней мере 1950–1960 гг., хорошо демонстрируются рис. 3. В последние же 40–70 лет среднегодовая температура воздуха и продолжительность безледного периода стабильно увеличиваются, площадь арктических льдов соответственно стабильно уменьшается, а зимняя АО изменяется разнонаправленно (рис. 3). Существует мнение, что на ледовые условия Арктики в эти годы в большей мере влияли процессы в атмосфере и океане, стимулированные деятельностью человека [2, 12, 13]. Выявленная рассинхронизация такого важного климатического параметра, как АО, регионального климата и ледовитости также, возможно, определяется глобальными климатическими изменениями. Нельзя исключать, однако, что ранее подобные события происходили и по природным причинам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что вариации химического состава накапливающихся донных осадков в центральной части моря Лаптевых зоне влияния Ленской полыни в значительной мере определяются изменчивостью редокс-условий придонных вод. Это было использовано для реконструкции методом трансферных функций изменчивости зимней полыни через значения индекса зимней арктической осцилляции, для которой имеется ряд непрерывных наблюдений в последние 120 лет. Реконструкция для последних 300 лет вариаций зимней полыни с использованием трансферной функции, связываю-

щей химический состав накопившихся в это время донных осадков и значения АО, выявило влияние полыни на увеличение среднегодовой температуры воздуха. Отмечена различная направленность влияния полыни на продолжительность безледного периода в последние десятилетия. Влияние антропогенной деятельности на развитие зимней полыни и на индекс АО требует специального изучения.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны М.С. Мельгунову, А.В. Дарьину, И.А. Калугину за выполнение высокотехнологичных лабораторных исследований, А.В. Рубчене за обсуждение некоторых положений работы, а также двум анонимным рецензентам за ценные замечания, значительно улучшившие качество статьи.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 21-17-00081). Экспедиционные работы поддерживались Министерством науки и высшего образования РФ (проект 121021700342-9). В работе частично использованы компьютерные программы, разработанные в рамках государственного задания ИГМ СО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаров В.Ф.* Морские льды в климатической системе СПб.: Гидрометеиздат. 1996. 213 с.
2. *Львова Е.В., Животовская М.А., Заболотских Е.В., Балашова Е.А., Барановский С.В.* Характеристики заприпайных полыней Карского моря по данным спутниковых микроволновых измерений сплоченности морского льда // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 203–214.
3. *Купецкий В.Н.* Стационарные полыни в замерзающих морях // Вестн. Ленинградского ун-та. 1958. № 12. С. 172–184.
4. *Попов А.В., Карелин И.Д., Рубченя А.В.* Роль зимних заприпайных полыней в формировании ледовых и гидрологических условий в морях Сибирского шельфа в летний период // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 65–74.
5. *Darby D.A., Ortiz J.D., Grosch C.E., Lund S.P.* 1500-year cycle in the Arctic Oscillation identified in Holocene Arctic sea-ice drift // Nature geoscience. 2012. V. 5. P. 897–900.
6. *Крутских Б.А.* Основные закономерности изменчивости режима арктических морей в естественных гидрологических периодах Л.: Гидрометеиздат. 1978. 91 с.
7. *Proshutinsky A.Y., Johnson M.A.* Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № 6. P. 12493–12514.

8. *Rigor I.G., Wallace J.M., Colony R.L.* On the response of sea ice to the Arctic Oscillation // *J. Clim.* 2002. V. 15. P. 2648–2668.
9. *Morison J., Kwok R., Peralta-Ferriz C., Alkire M., Rigor I., Andersen R., Steele M.* Changing Arctic Ocean freshwater pathways // *Nature*. 2012. V. 481. P. 66–70.
10. *Magny M.* Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements // *Quat. Int.* 2004. V. 113. P. 65–79.
11. *Lamy F., Arz H.W., Bond G.C., Bahr A., Pätzold J.* Multicentennial-scale hydrological changes in the Black Sea and northern Red Sea during the Holocene and the Arctic/North Atlantic Oscillation // *Paleoceanography*. 2006. V. 21. PA1008.
12. *Плотников В.В., Вакульская Н.М., Мезенцева Л.И., Дубина В.А., Пустошнова В.И.* Изменчивость ледовых условий в Чукотском море и их связь с арктической осцилляцией // *Известия ТИНРО*. 2020. Т. 200. № 1. С. 155–167.
13. *Лемешко Е.Е., Лемешко Е.М., Новицкая В.П.* Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и Баренцева морей // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021. № 2. С. 47–64.
14. *Астахов А.С., Калугин И.А., Ши Сюефа, Аксентов К.И., Дарьин А.В., Ху Лимин, Бабич В.В., Мельгунов М.С., Плотников В.В.* Роль ледяного покрова в формировании химического состава донных осадков восточно-сибирского шельфа // *Геохимия*. 2021. Т. 66. № 6. С. 526–540.
15. *Astakhov A.S., Aksentov K.I., Babich V.V., Darin A.V., Kalugin I.A., Melgunov M.S., Sattarova V.V., Hu L., Shi X.* Ice Coverage of the Laptev Sea and Air Temperature Variation during Recent Centuries: Observed Data and Reconstructions Using a Geochemical Proxy // *Curr. Chinese Sci.* 2022. V. 2. № 3. P. 198–212.
16. *Astakhov A.S., Babich V.V., Shi X., Hu L., Obrezkova M.S., Aksentov K.I., Alatorsev A.V., Darin A.V., Kalugin I.A., Karnaukh V.N., Melgunov M.S.* Climate and Ice conditions of East Siberian Sea during Holocene: reconstructions based on sedimentary geochemical multiproxy // *The Holocene*. 2023. V. 33. № 1. P. 3–13.
17. *Бабич В.В.* Итерационный метод целевого классифицирования и упорядочения объектов / В кн: *Распознавание образов в задачах качественного прогноза рудных месторождений*. Глава 6. Новосибирск: Наука, Сиб. отд. 1980. С. 59–67.
18. *Луков А.Ю.* Экосистема Сибирской польни. Москва: Научный мир, 1999. 334 с.
19. *Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане*. 2007. Ред.: Фролов И.Е. СПб: ААНИИ, 2008, 85 с.
20. *Kinnard C., Zdanowicz C.M., Fisher D.A., Isaksson E., de Vernal A., Thompson L.G.* Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years // *Nature*. 2011. V. 479. № 7374, 509.

## THE WINTER LAPTEV SEA POLYNYA AND ARCTIC OSCILLATION DURING THE LAST 300 YEARS: RECONSTRUCTIONS ON GEOCHEMICAL PROXY

A. S. Astakhov<sup>a, #</sup>, V. V. Babich<sup>b</sup>, A. Yu. Gukov<sup>c</sup>, and A. V. Alatorcev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

<sup>b</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>c</sup> Yakutsk Department of Hydrometeorology, Tiksi, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: astakhov@poi.dvo.ru

Presented by Academician of the RAS G.I. Dolgikh March 2, 2023

It is shown that the area of winter Siberian polynya in the Laptev Sea has a negative correlation with the Arctic oscillation index (AO) for the winter period. Using this, a transfer function has been developed that connects the variations of winter polynya (the time series of the winter AO) and the geochemical time series of bottom sediments accumulated during the instrumental period (1898–2018) in the zone of distribution of the Lena polynya. The influence of winter polynya on sedimentation is determined by the formation of highly saline and cold waters entering to the bottom horizons. During the summer and in subsequent seasons, they determine the stratification of the water column of the shelf and make it difficult to convection. As a result, an oxygen deficit is formed in the bottom horizons, and the bottom sediments are enriched with redox-sensitive elements of anoxic environments and depleted of redox-sensitive elements of oxide environments. Reconstructions using the developed transfer function of the polynya during the last three centuries showed that its active development increases the average annual air temperature in the adjacent areas, but multidirectional affects the duration of the ice-free period.

**Keywords:** paleoclimatology, bottom sediments, geochemistry, winter polynya, Arctic oscillation, Laptev Sea, transarctic drift