

УДК 551.46

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕЙТЕРИЕВОГО ЭКСЦЕССА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ОПРЕСНЕНИЯ В ЗАЛИВАХ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ

С. А. Коссова^{1,*}, Е. О. Дубинина¹, А. Ю. Мирошников¹,
член-корреспондент РАН М. В. Флинт²

Поступило 28.03.2019 г.

Проведено изотопно-геохимическое изучение вод заливов Цивольки и Седова (юго-восточное побережье архипелага Новая Земля), в опреснении которых принимает участие несколько потенциальных источников — речной сток с континента, атмосферные осадки региона, воды, поступающие с архипелага. Показана возможность применения дейтериевого эксцесса для идентификации пресных компонентов, поступающих в акватории изученных заливов. Расчёты, проведённые на примере материала, отобранного в 2015 г., показали присутствие в поверхностных водах залива Седова эстуарных вод Оби. В тот же период времени воды галоклина залива Цивольки показывают опреснение за счёт локальных источников — стока с архипелага Новая Земля.

Ключевые слова: изотопы кислорода и водорода, солёность, морская вода, Арктика, Карское море, опреснение, Новая Земля.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524872212-216>

ВВЕДЕНИЕ

Заливы восточного берега архипелага Новая Земля — уникальные природные объекты, имеющие существенное влияние на экосистему Карского моря, поскольку в них поступают сток с покровных ледников и водотоки архипелага, несущие антропогенный сигнал. Кроме того, заливы могут служить “плацдармами” для проникновения в экосистему Карского моря вредоносных биологических видов-вселенцев [1, 2]. Таким образом, проблема взаимодействия акваторий заливов с Карским бассейном имеет высокую актуальность [3, 4]. Наиболее современным методом изучения процессов обмена, смешения и трансформации вод в морских акваториях является применение природных изотопов — трассеров изотопного состава кислорода и водорода воды.

Несмотря на высокую изученность вод Карского моря [5–7], изотопных исследований акваторий заливов Новой Земли ранее не проводилось. Связь изотопного состава кислорода или водорода с солёностью является высокоинформативной для идентификации источников опреснения морских вод [8, 9] и количественных оценок их вклада [10]. Од-

нако в случае нескольких источников опреснения данный подход не всегда применим, особенно когда изотопные параметры пресных вод разного генезиса перекрываются или близки. Для верхнего перемешанного слоя водной толщи и галоклина в заливах восточного побережья Новой Земли такой вариант опреснения очевиден. Здесь действуют глобальные (воды континентального стока, атмосферные осадки) и локальные (воды, поступающие с архипелага) источники опреснения.

Самостоятельным параметром, который может применяться для идентификации источников опреснения морской воды, является дейтериевый эксцесс. Применение этого параметра имеет смысл, если дейтериевый эксцесс пресных вод разного происхождения, поступающих в морские воды, различен. Данная ситуация наблюдается для стока Оби и Енисея, ледников Северного острова и атмосферных осадков, выпадающих в районе Новой Земли. Это позволило применить дейтериевый эксцесс для изучения вод заливов Цивольки и Седова, расположенных в 45 км друг от друга на восточном берегу Северного острова Новой Земли. Глобальные источники опреснения для этих заливов должны быть одни и те же, а вклад локальных источников может различаться, поскольку в заливе Цивольки присутствуют талые воды и фрагменты ледника Серп и Молот, а в залив Седова пресные воды поступают только в виде водотоков. Оценка вклада пресных вод разного генезиса проведена для данных заливов как

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук, Москва

*E-mail: sonch_1@rambler.ru

классическим способом, т.е. через связь изотопных параметров с солёностью, так и с применением дейтериевого эксцесса. В результате удалось установить присутствие и соотношение вкладов разных источников опреснения (в том числе вод речного стока с континента) в водах верхнего перемешанного слоя и галоклина.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал для исследований был отобран в рейсах нис “Профессор Штокман” (2014 г.) и нис “Академик Мстислав Келдыш” (2015 и 2016 гг.). Пробы в заливе Цивольки получены во всех трёх экспедициях, в заливе Седова — в двух последних. Кроме того, были опробованы лёд ледника Серп и Молот и вода из локальных водотоков и с поверхности акваторий заливов вблизи источников опреснения. В последнем случае изотопные параметры пресного компонента были рассчитаны экстраполяцией на нулевую солёность.

Отбор проб в заливах проведён батометрами Нискина Океанографического зонда SBE 911 с комплексом Rosette SBE 32. Были опробованы горизонты от поверхности до дна, глубина которого менялась для разных станций от 60 до 140 м. Изотопный анализ кислорода выполнен методом изотопного уравновешивания в режиме CF IRMS с использованием масс-спектрометра DELTA V+ и опции GasBenchII (“Thermo”, Германия). Изотопный анализ водорода выполнен в режиме DI IRMS методом разложения микрообразцов на горячем хrome. Точность определения величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD составила $\pm 0,05$ и $\pm 0,03\text{‰}$ соответственно. Калибровка данных проведена в международной шкале “V-SMOW-V-SLAP”. Детальное описание методов приведено в [6, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Воды обоих заливов демонстрируют сходное распределение величин δD , $\delta^{18}\text{O}$ и солёности, значения которых возрастают с глубиной. Вариации этих параметров наблюдаются только в верхнем перемешанном слое и галоклине, которые были наиболее опреснены в 2015 г. ($S \approx 24$). Для водотоков в заливе Цивольки величины δD и $\delta^{18}\text{O}$ составляют $-118,2 \pm 0,5$ и $-16,5 \pm 0,05\text{‰}$ соответственно, в заливе Седова $\approx -105,2 \pm 0,1$ и $-14,6 \pm 0,03\text{‰}$ соответственно. Величины δD и $\delta^{18}\text{O}$ льда из ледника Серп и Молот, изменяются от $-113,4$ до $-125,5\text{‰}$ и от $-15,7$ до $-17,7\text{‰}$ ($n = 22$). Усреднённые величины δD и $\delta^{18}\text{O}$ речного стока Оби, Енисея и регионального атмосферного компонента приняты согласно опубликованным ранее данным [6].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные показывают, что воды верхнего перемешанного слоя и галоклина в обоих заливах опреснены по отношению к баренцевоморским водам атлантического происхождения, господствующим в районах Карского моря, прилежащих к заливам. Для рассмотрения процессов опреснения в координатах “изотопный состав — солёность” [10, 11] в данной работе была использована связь $\delta\text{D}-S$. Поскольку для изучаемых заливов характерно несколько источников опреснения с разными изотопными характеристиками (рис. 1), наблюдаемый состав вод заливов в данных координатах можно сравнить с набором линий, отвечающих двухкомпонентному смешению каждого из потенциальных источников опреснения с одним и тем же морским компонентом.

На рис. 2 видно, что в водах залива Цивольки по мере падения солёности изменяется тип преобладающего источника опреснения. Воды верхнего перемешанного слоя и галоклина обоих заливов, опреснённые до $S \approx 24$, содержат до 28–34% пресного компонента, что близко к оценкам содержания пресных вод в поверхностном слое вод Карского моря (40%) [12]. Они характеризуются низкими величинами δD (до -37‰) и $\delta^{18}\text{O}$ (до $-5,1\text{‰}$). В координатах $\delta\text{D}-S$ они попадают как в область опреснения локальным стоком с Новой Земли, так и на линию смешения с водами Оби (рис. 2). Это не даёт возможности точно определить источник пресных вод только на основании связи $S-\delta\text{D}$.

Эстуарные воды Енисея

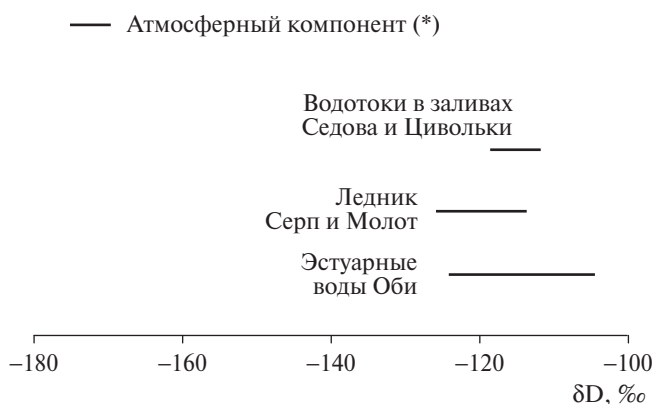


Рис. 1. Вариации изотопного состава водорода в потенциальных источниках опреснения заливов Новой Земли: (*) — усреднённый изотопный состав водорода в атмосферных осадках района Карского моря и моря Лаптевых [6].

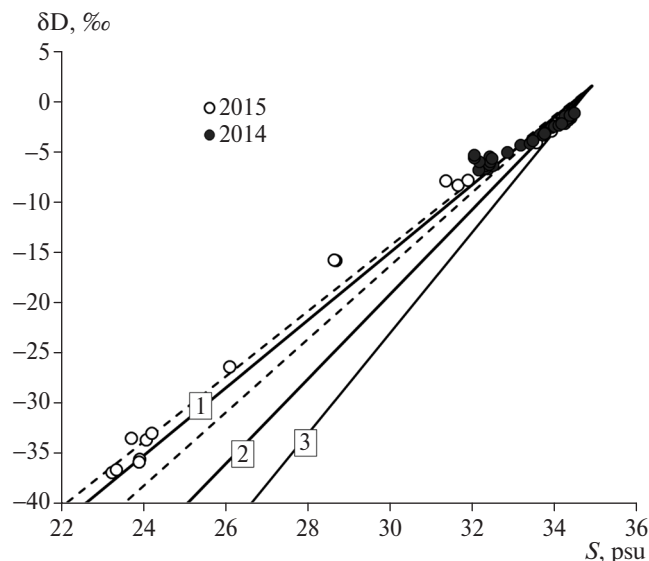


Рис. 2. Изотопный состав водорода и солёность вод залива Цивольки, отобранных в 2014 и 2015 гг. Линии 1, 2, 3 — смешение морского компонента атлантического происхождения с водами Оби, Енисея и региональных атмосферных осадков соответственно. Пунктиром ограничена область составов, характерных для двухкомпонентного смешения с водами, поступающими с архипелага Новая Земля.

В случае проведения изотопного анализа двух изотопных систем молекулы воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) можно воспользоваться дополнительным параметром — дейтериевым эксцессом [8], который рассчитывается по уравнению

$$d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}.$$

Он характеризует условия формирования атмосферной влаги, которая является источником любых пресных вод [13, 14]. Для Новой Земли данный параметр имеет стабильно высокие значения ~ 13 – 14% , иногда достигающие величин более 20% . Для р. Оби этот параметр меняется в зависимости от сезона, но в целом он существенно ниже. Согласно нашим данным, величина d в водах Оби в среднем составляет 8% , в то время как в пробах льда ледника Серп и Молот она достигает $18,2\%$. Заметное различие дейтериевого эксцесса в потенциальных источниках опреснения заливов Новой Земли позволяет использовать его для идентификации пресных вод, поступивших в залив. Для того чтобы использовать величину d , предварительно были рассчитаны изотопные параметры (δD и $\delta^{18}\text{O}$) пресного компонента для каждой пробы опреснённой морской воды, по которым далее рассчитывался дейтериевый эксцесс.

На рис. 3 приведены рассчитанные величины d и интервалы дейтериевого эксцесса, соответствующие

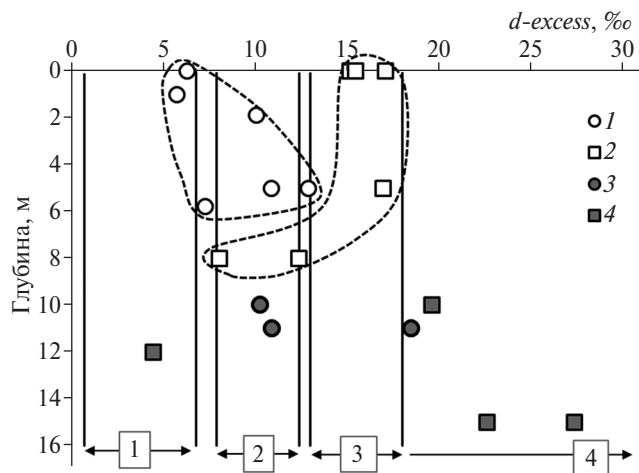


Рис. 3. Величина дейтериевого эксцесса, рассчитанная в пресном компоненте, присутствовавшем в водах заливов Цивольки и Седова в 2015 г. Легенда: 1, 2 — воды верхнего перемешанного слоя заливов Цивольки и Седова, 3, 4 — воды верхнего горизонта галоклина заливов Цивольки и Седова соответственно. Цифры в квадратах — интервалы d -excess в потенциальных источниках опреснения: 1 — воды р. Оби в июле–сентябре 2015 г., 2 — воды р. Енисей в то же время, 3 — локальный сток с Новой Земли и локальные атмосферные осадки, 4 — талые воды ледника Серп и Молот.

ющие основным потенциальным источникам пресных вод, поступающих в заливы Седова и Цивольки в 2015 г. Расчёт показывает, что в это время опресняющий компонент поверхностных вод залива Седова был представлен в основном эстуарными водами Оби. С глубиной речной компонент уступает водам локального стока с архипелага. В поверхностных водах залива Цивольки, напротив, преобладают воды, поступавшие с Новой Земли, но в верхней части галоклина (на глубине 10–15 м) начинает доминировать компонент ледникового происхождения, имеющий anomalously высокие величины d -excess.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заливы восточного берега Северного острова Новой Земли являются природным объектом, где для множества источников опреснения наблюдается контрастное распределение величин дейтериевого эксцесса. Это позволяет применить данный параметр и не только идентифицировать опресняющие компоненты, но и рассмотреть их соотношение в толще вод. Данный подход может быть применён и в других акваториях Мирового океана, для чего требуется систематика изотопных (δD и $\delta^{18}\text{O}$) параметров потенциальных источников опреснения, наличие соответствующих изотопных данных для

опреснённых вод и данных по солёности. Расчёт дейтериевого эксцесса в опресняющем компоненте можно проводить только для вод с высокими степенями опреснения, к которым относятся верхний перемешанный слой и воды верхних горизонтов галоклина. В противном случае полученные оценки могут быть ошибочными.

На примере заливов Седова и Цивольки удалось показать, что величина дейтериевого эксцесса может являться самостоятельным параметром, позволяющим проводить идентификацию источников сложно опреснённых морских вод. Проведённые исследования подтвердили заключения [3, 4, 15], что заливы восточного берега Новой Земли, несмотря на наличие входного бара, могут интенсивно обмениваться водами с Карским бассейном, о чём свидетельствует наличие обской воды в заливе Седова. Полученные оценки принципиально важны для понимания роли экосистем заливов архипелага в переносе радиоактивного и техногенного загрязнений, распространения аллохтонной фауны и видов-вселенцев в Карском море.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18–05–00740 и 18–05–00480, полевые исследования поддержаны Проектом РНФ 14–50–00095. Разработка методов интерпретации сложно опреснённых морских вод проведена при поддержке гранта РНФ 18–17–00089.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zalota A.K., Spirodonov V.A., Vedenin A.A.* Development of Snow Crab *Chionoecetes Opilio* (Crustacea: Decapoda: Oregonidae) Invasion in the Kara Sea // *Polar Biology*. Publ. online 19 May 2018. DOI: 10.1007/s00300-018-2337-y.
2. *Флинт М.В., Арашкевич А.Г., Артемьев В.А. и др.* Экосистемы морей Сибирской Арктики. Материалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 годов. М.: АПР, 2018. 232 с.
3. *Амелина А.Б., Дриц А.В., Сергеева О.М. и др.* Зоопланктон заливов архипелага Новая Земля: состав, распределение, роль в выедании фитопланктона и биоседиментации // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 6. С. 906–922.
4. *Степанова С.В., Недоспасов А.А.* Особенности гидрофизического и гидрохимического режимов залива Благополучия (Новая Земля) // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 75–85.
5. *Bauch D., Erlenkeuser H., Stanovoy V., et al.* Freshwater Distribution and Brine Waters in the Southern Kara Sea in Summer 1999 as Depicted by $\delta^{18}\text{O}$ Results. In: *Siberian River Run-Off in the Kara Sea*. Amsterdam, 2003. P. 73–90.
6. *Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю., Кокрятская Н.М.* Изотопная (δD , $\delta^{18}\text{O}$) систематика вод морей Арктического сектора России // *Геохимия*. 2017. № 11. С. 1041–1052.
7. *Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю., Фяйзулина П.В.* Изотопные (δD , $\delta^{18}\text{O}$) параметры и источники опреснённых вод Карского моря // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 38–48.
8. *Dansgaard W.* Sable Isotopes in Precipitation // *Tellus*. 1964. V. 19. P. 435–463.
9. *Craig H., Gordon L.* Deuterium and Oxygen-18 Variations in the Ocean and the Marine Atmosphere. In: *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*. Spoleto, 1965. P. 9–130.
10. *Ostlund H.G., Hut G.* Arctic Ocean Water Mass Balance From Isotope Data // *J. Geophys. Res.* 1984. № 89. P. 6373–6381.
11. *Frew R.D., Dennis P.F., Heywood K.J., Meredith M.P., Boswell S.M.* The Oxygen Isotope Composition of Water Masses in the Northern North Atlantic // *Deep-Sea Res.* 2000. № 47. P. 2265–2286.
12. *Pavlov V.K., Pfirman S.L.* Hydrographic Structure and Variability of the Kara Sea: Implications for Pollutant-distribution // *Deep-Sea Res.* 1995. V. 42. № 6. P. 1369–1390.
13. *Merlivat L., Jouzel J.* Global Climatic Interpretation of the Deuterium Excess-Oxygen 18 Relationship for Precipitation // *J. Geophys. Res.* 1974. № 84. P. 5029–5033.
14. *Aemisegger F., Pfahl S., Sodemann H., Lehner I., Seneviratne S.I., Wernli H.* Deuterium Excess as a Proxy for Continental Moisture Recycling and Plant Transpiration // *Atmos. Chem. and Phys.* 2014. V. 14. P. 4029–4054.
15. *Маккавеев П.П., Полухин А.А., Хлебонашев П.В.* Поверхностный сток биогенных элементов с берега залива Благополучия (арх. Новая Земля) // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 5. С. 610–617.

**APPLYING OF DEUTERIUM EXCESS FOR IDENTIFICATION
OF FRESH WATER SOURCES IN THE BAYS
OF NOVAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO**

**S. A. Kossova¹, E. O. Dubinina¹, A. Yu. Miroshnikov¹,
Corresponding Member of the RAS M. V. Flint²**

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Biochemistry
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation (IO RAS)*

Received March 28, 2019

An isotopic-geochemical study was carried out for the waters of Tsvolki and Sedov bays (southeastern coast of the Novaya Zemlya archipelago). Waters of these bays can be freshened by several potential sources which are river runoff from the continent, atmospheric precipitation of the region, waters coming from the archipelago. The possibility to use deuterium excess for identification of freshwater components in the waters which enter the studied bays is shown. Calculations made on the material sampled in 2015 showed the presence of the Ob river estuary waters in the surface waters of the Sedov Bay. At the same period, the waters of the halocline of Tsvolki Bay show freshening by local sources — runoff from the Novaya Zemlya archipelago.

Keywords: oxygen and hydrogen isotopes, salinity, sea water, Arctic, Kara Sea, freshening, Novaya Zemlya.