

УДК 551.465

## ПЕРЕНОС МАТЕРИКОВЫХ ВОД ЧЕРЕЗ ПРОЛИВ ВИЛЬКИЦКОГО В СЕНТЯБРЕ 2017 И 2018 гг.

© 2020 г. П. Н. Маккавеев<sup>1</sup>, \*, А. А. Полухин<sup>1</sup>, \*\*, С. А. Щука<sup>1</sup>, С. В. Степанова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: makkaveev55@mail.ru

\*\*e-mail: polukhin@ocean.ru

Поступила в редакцию 15.01.2020 г.

После доработки 15.01.2020 г.

Принята к публикации 16.03.2020 г.

Считается, что воды рек, впадающих в Карское море (главным образом сток рек Енисей и Обь) могут распространяться на восток, проникая в море Лаптевых с прибрежным течением вдоль берега. Это может проходить при так называемом “восточном переносе” материкового стока. В экспедиции на НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2018 г. следы речных вод были обнаружены в проливе Вилькицкого. Гидрохимические данные с большой уверенностью позволяют предположить, что эти воды принесены из Обско-Енисейского приустьевого района. Годом ранее таких вод в проливе не наблюдалось. Связано это с тем, что в 2018 г. наблюдался хорошо выраженный “восточный перенос” вод из Карского моря в море Лаптевых. То, что трансформированные речные воды принесены в пролив со стороны Карского моря показывают и результаты отбора проб по ходу судна.

**Ключевые слова:** Карское море, пролив Вилькицкого, материковый сток, перенос вод, щелочность, кремний

**DOI:** 10.31857/S0030157420030053

### ВВЕДЕНИЕ

Водообмен морей Карского и Лаптевых происходит через проливы в архипелаге Северная Земля и, в большей степени, между полуостровом Таймыр и о. Большевик через пролив Вилькицкого. Длина пролива 104 км, ширина в наиболее узкой части 55 км, глубины от 32 до 210 м. Другие проливы между островами архипелага, например, Шокальского и Красной Армии, значительно меньше по размерам, основную часть года промерзают практически по всему столбу воды и их роль в водообмене между морями невелика. Карское море в наибольшей степени из всех морей Арктики подвержено воздействию речного стока [4]. Можно считать, что практически все поверхностные воды Карского моря в той или иной степени образованы при участии вод материкового стока [5, 7]. Суммарный сток рек, впадающих в Карское море, составляет 1350 км<sup>3</sup>/год, из этого объема на долю вод Обской губы и Енисея приходится 82% [9]. Море Лаптевых подвержено воздействию материкового стока в меньшей степени, средний годовой сток в его акваторию составляет 745 км<sup>3</sup>, и около 70% из него приходится на долю р. Лена [3, 12].

Считается, что северо-западная часть моря Лаптевых не испытывает сильного влияния впа-

дающих в него влияния рек, ее гидрохимическая структура формируется в основном под влиянием водных масс, поступающих из Арктического бассейна. Ведь в западной части моря Лаптевых сосредоточено не более 20% от его речного стока. В научной литературе есть сведения, что иногда на эту часть моря распространяется влияние речного стока из Карского моря, проходящего через пролив Вилькицкого [1, 16], и что проникновение трансформированных речных вод в район пролива со стороны Карского моря [18] более вероятно, чем с востока. Также существует теория о практически непрерывном вдольбереговом движении пресных вод с запада на восток вдоль всего побережья Арктики [20].

По литературным данным известно несколько типов распространения материкового стока по акватории Карского моря. Так, в работе [17] говорится о 4-х типах: “восточном”, “центральной”, “западном” и “юго-западном”. Позднее, в работе [5] в результате объединения “западной” и “юго-западной” схемы выделяется 3 типа распространения материкового стока. Естественно, основной причиной, по которой речной сток распределяется подобным образом, являются гидрометеорологические условия [5], в первую очередь, это воздействие ветра на поверхностный опресненный слой.

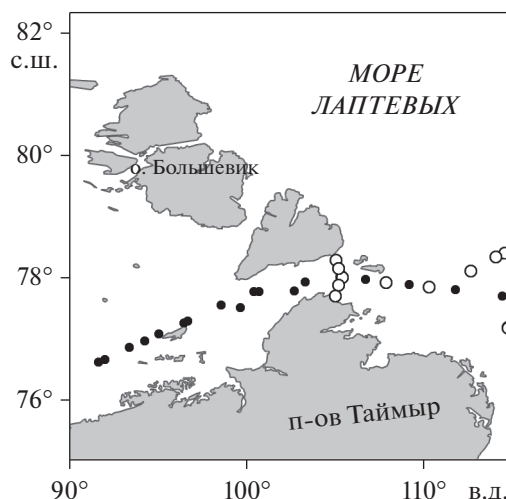


Рис. 1. Схема распределения гидрологических станций (круги) и отбора поверхностных проб (черные точки) во время экспедиций ИО РАН 2017–2018 гг.

Дальность проникновения речных вод, форма и площадь распространения опресненного слоя в Карском море существенно варьируют месяц от месяца и год от года. Так, при западном типе распространения опресненные воды могут достигать восточных берегов арх. Новая Земля. Центральный тип распространения характеризуется дальним проникновением опресненных вод на север. При восточном типе распространения речные воды прижимаются к берегу п-ва Таймыр и в виде пограничного течения переносятся к островам Северной Земли и в море Лаптевых.

“Восточный” тип распространения поверхностных опресненных речным стоком вод в настоящее время считается наиболее редкой ситуацией для бассейна [6]. Так, в теплый период 1993–2017 гг. “центральный” тип распространения поверхностного опресненного слоя наблюдался в 11 случаях, “западный” – в 9, а “восточный” – в 4 случаях. Но в первой половине XX века “восточный” тип распространения, когда воды обь-енисейского стока распространяются вдоль берегов п-ова Таймыр, достигая пролива Вилькицкого и даже проникая в море Лаптевых, считался очень распространенным. По данным [18] такая схема переноса речного стока наблюдалась в 1933, 1935, 1937, 1940 и 1948 гг.

Таким образом, изучение структуры вод пролива Вилькицкого значимо для понимания масштабов обмена между морями, в том числе и проникновения вод Обско-Енисейского района в море Лаптевых.

## МАТЕРИАЛЫ

В 72-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” работы в проливе Вилькицкого велись 3–

5 сентября 2018 г. Исследование проникновения через пролив вод из Обско-Енисейского района в море Лаптевых было одной из целей этих работ. Было выполнено 2 разреза, I – протянувшийся с востока на запад, от открытого моря, в сторону пролива, II – расположенный в проливе от о. Большевик до п-ова Таймыр (рис. 1). Всего отбор проб для гидрохимического анализа проводился на 10 гидрологических станциях. Кроме того, во время работ 2017 и 2018 гг. при проходе пролива с запада на восток и в обратном направлении отбирались пробы поверхностной воды каждые 3 часа. В 2017 г. проход через пролив с отбором проб был 30–31 августа (с запада на восток) и 21 сентября (в обратном направлении). Гидрохимические работы велись в судовой лаборатории по методикам, принятым в отечественной практике [14, 15].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Во время работ обоих лет вдоль пролива Вилькицкого в направлении запад – восток практически на всем разрезе верхний квазиоднородный слой с положительной температурой распространялся до глубины 20–25 м. На глубоководных (глубже 350 м) станциях 5944\_2 – 5968 ниже 25 м лежали воды с отрицательной температурой. Особняком стояли станции 5966 и 5967, расположенные на континентальном склоне при выходе в глубокую Арктику (глубины здесь достигали 500 м). В этой области наблюдалось взаимодействие шельфовых вод моря Лаптевых, вод Карского моря и вдоль-склонового течения, несущего модифицированные атлантические воды в юго-восточном направлении.

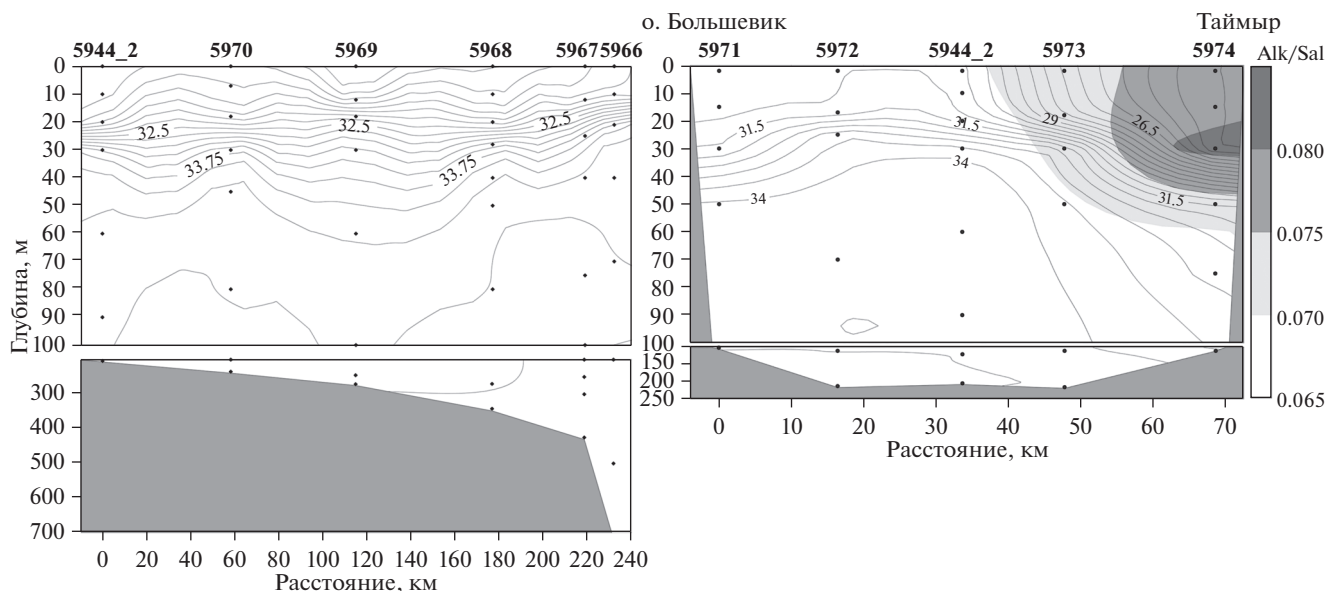


Рис. 2. Распределение солёности (psu) на разрезах в проливе Вилькицкого, заштрихована область, где величина удельной щёлочности более 0.07.

На разрезе от пролива к морю Лаптевых (станции 5944, 5966–5970) минимальная солёность на поверхности наблюдалась на ст. 5969 до 30.175 епс и на ст. 5944 – 30.797 епс (рис. 2). Судя по величине удельной щёлочности (от 0.067 до 0.070) влияния материкового стока на этом разрезе не прослеживалось [18]. Понижение солёности в поверхностных водах связано, скорее всего, с таянием морского льда.

На разрезе поперек пролива в южной его части (ст. 5973 и 5974) хорошо прослеживаются более пресные и теплые воды. Температура на разрезе менялась в диапазоне от  $-1.507^{\circ}\text{C}$  (ст. 5944, 111 м) до  $4.291^{\circ}\text{C}$  (ст. 5974, 10 м), солёность – от 24.465 psu (ст. 5974, 10 м) до 34.648 psu (ст. 5944, 206 м). Минимальная солёность наблюдалась на ст. 5974 в южной части, примыкающей к берегам п-ова Таймыр (рис. 2). Величина удельной щёлочности (УЩ) здесь повышалась почти до 0.080, что подтверждает присутствие вод материкового стока, хотя и сильно трансформированных.

Возможность присутствия вод материкового происхождения в южной части этого разреза подтверждается и распределением величины общей титруемой щёлочности (Alk). На разрезах ее величина менялась от 1.879 до 2.363 мг-экв/л. Минимальная величина наблюдалась в поверхностных водах, в южной части разреза поперек пролива. Ко дну величина Alk росла на обоих разрезах, составляя в водах ниже 100 м 2.347–2.355 мг-экв/л. На разрезе I величина Alk монотонно росла от поверхности ко дну, небольшое заглубление изолиний отмечено в западной части разреза, непосредственно в самом проливе (рис. 3).

Другим хорошим индикатором материкового стока считается растворенный неорганический кремний (силикаты). Содержание растворенного кремния на разрезах менялось от 0.78 до 11.92  $\mu\text{M}$ . Максимальное содержание кремния было в поверхностных водах на самой южной станции разреза II (№ 5974), где это могло быть вызвано как стоком вод с берега п-ва Таймыр, так и переносом вод с запада, из бассейна Карского моря. Минимум наблюдался на поверхности самой мористой станции разреза I (№ 5966). На разрезе I распределение кремния было достаточно ровным и малоградиентным (рис. 4). Можно отметить повышение его содержания до 4  $\mu\text{M}$  ко дну и повышение до 4–5  $\mu\text{M}$  в слое минимальной температуры в средней части разреза. На разрезе II распределение кремния, напротив, было очень контрастным. Резко отличалась северная часть разреза, где содержание кремния было сходным с разрезом I, и южная часть, где содержание кремния было повышено во всей толще вод.

Что касается других гидрохимических показателей, то они, в общем, соответствовали средним показателям для этого района и сезона [10, 11]. Воды были хорошо аэрированы по всей глубине, насыщение воды кислородом было не менее 85% даже у дна. Степень насыщения вод кислородом (в среднем по разрезу 92%) показывает, что продукционные процессы в водной толще еще преобладают над процессами окисления. Содержание минерального фосфора не опускалось до аналитического нуля (предела обнаружения по методике). Это свидетельствует о том, что фосфор не был лимитирующим фактором развития

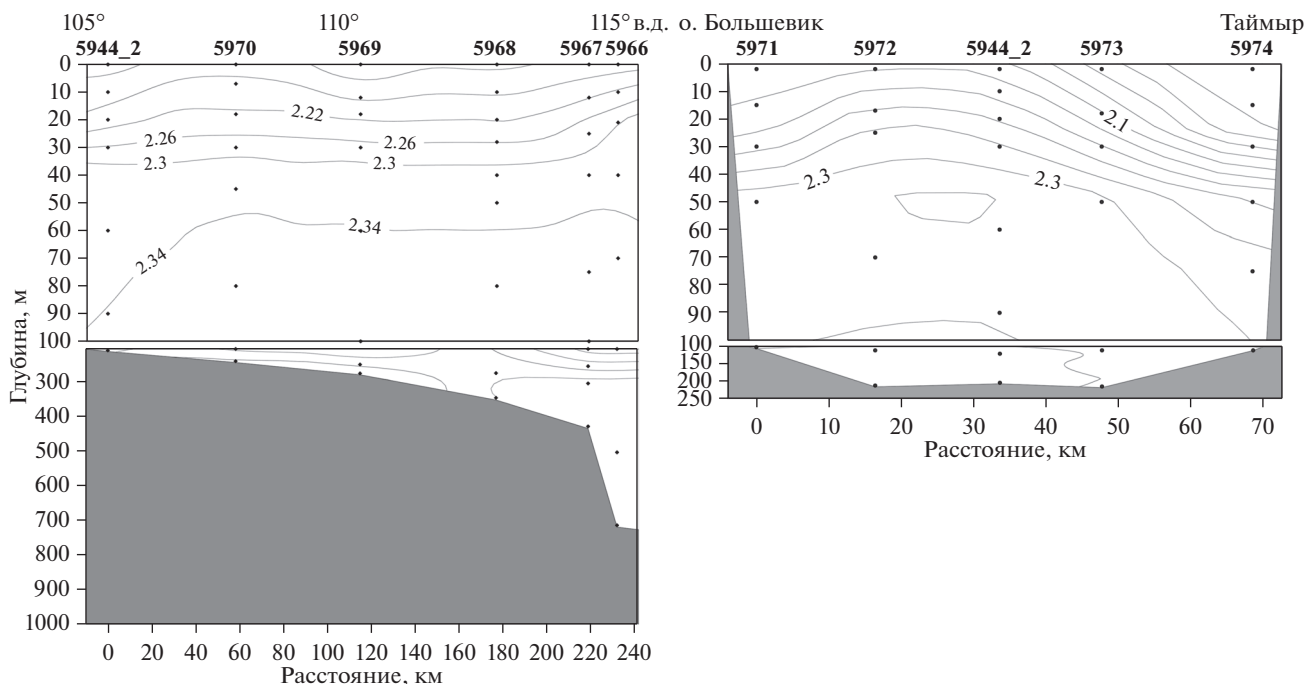


Рис. 3. Распределение величины Alk (мг-экв/л) на разрезах в проливе Вилькицкого.

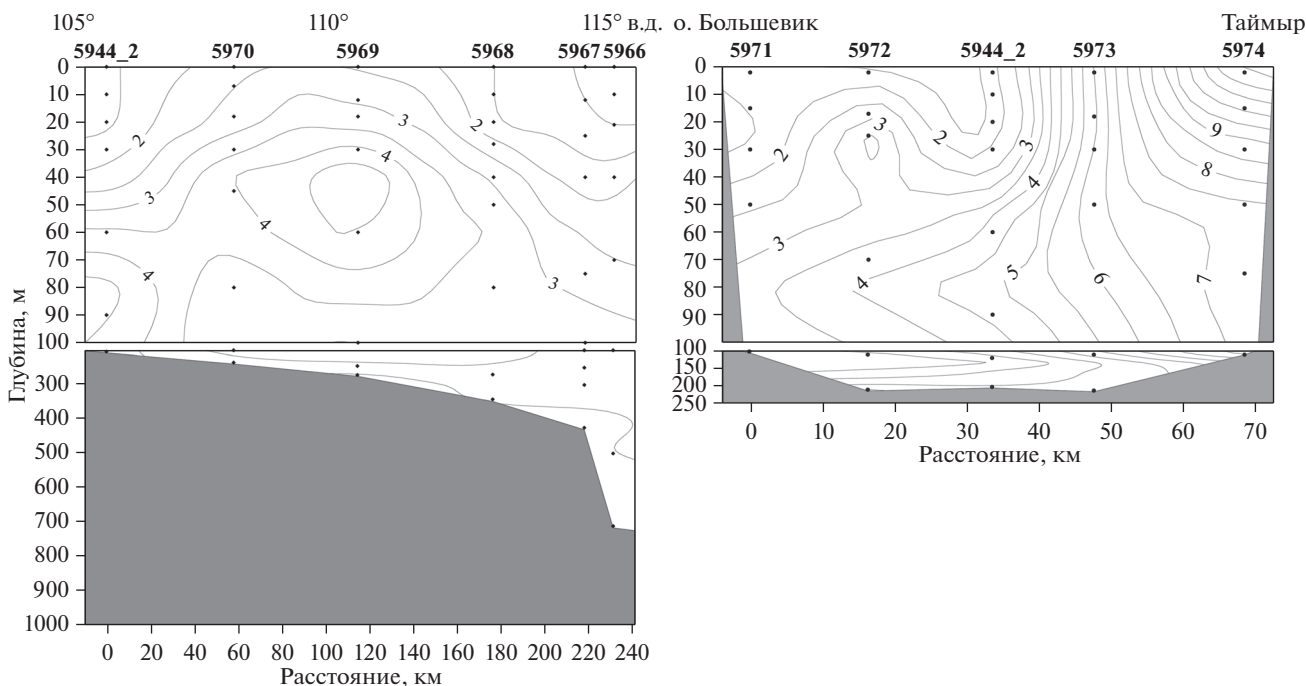
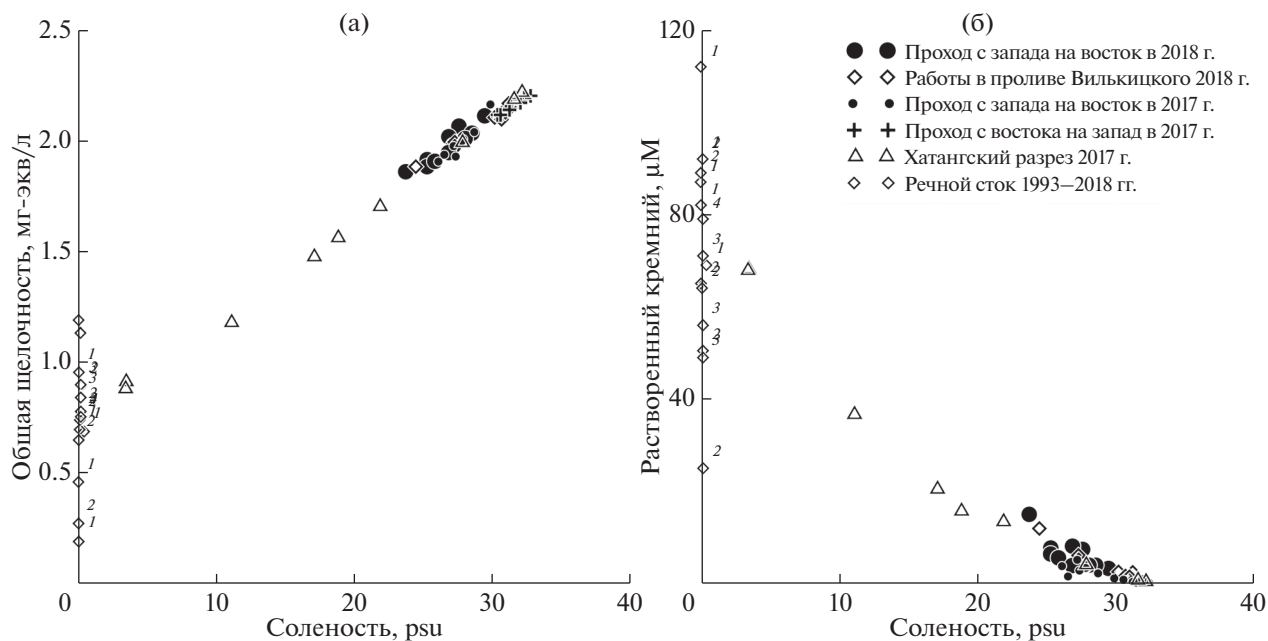


Рис. 4. Распределение содержания растворенного кремния (µM) на разрезах в проливе Вилькицкого.

фитопланктона. Наблюдался и обычный для высокоширотных морей дефицит минерального азота. Концентрация нитритного азота (N-NO<sub>2</sub>) на разрезах была от аналитического нуля до 0.30 µM. На фоне низкого, почти нулевого содер-

жания нитратов почти по всей толще вод на обоих разрезах существует значительный максимум их в слое минимальной температуры. Наиболее хорошо заметно это было на перифериях разрезов. Повышенное содержание нитритного азота



**Рис. 5.** Зависимость величин общей титруемой щелочности (а) и содержания растворенного кремния (б) от солености в поверхностных водах пролива Вилькицкого и в водах некоторых рек региона: 1 – р. Обь, 2 – р. Енисей, 3 – р. Лена, 4 – р. Хатанга.

(до 1  $\mu\text{M}$  и более) на разрезах в слое минимума температуры показывает слой, где градиент плотности вод приводил к возникновению эффекта “жидкого дна” и создавались условия для накопления опускающихся из верхних слоев органических остатков.

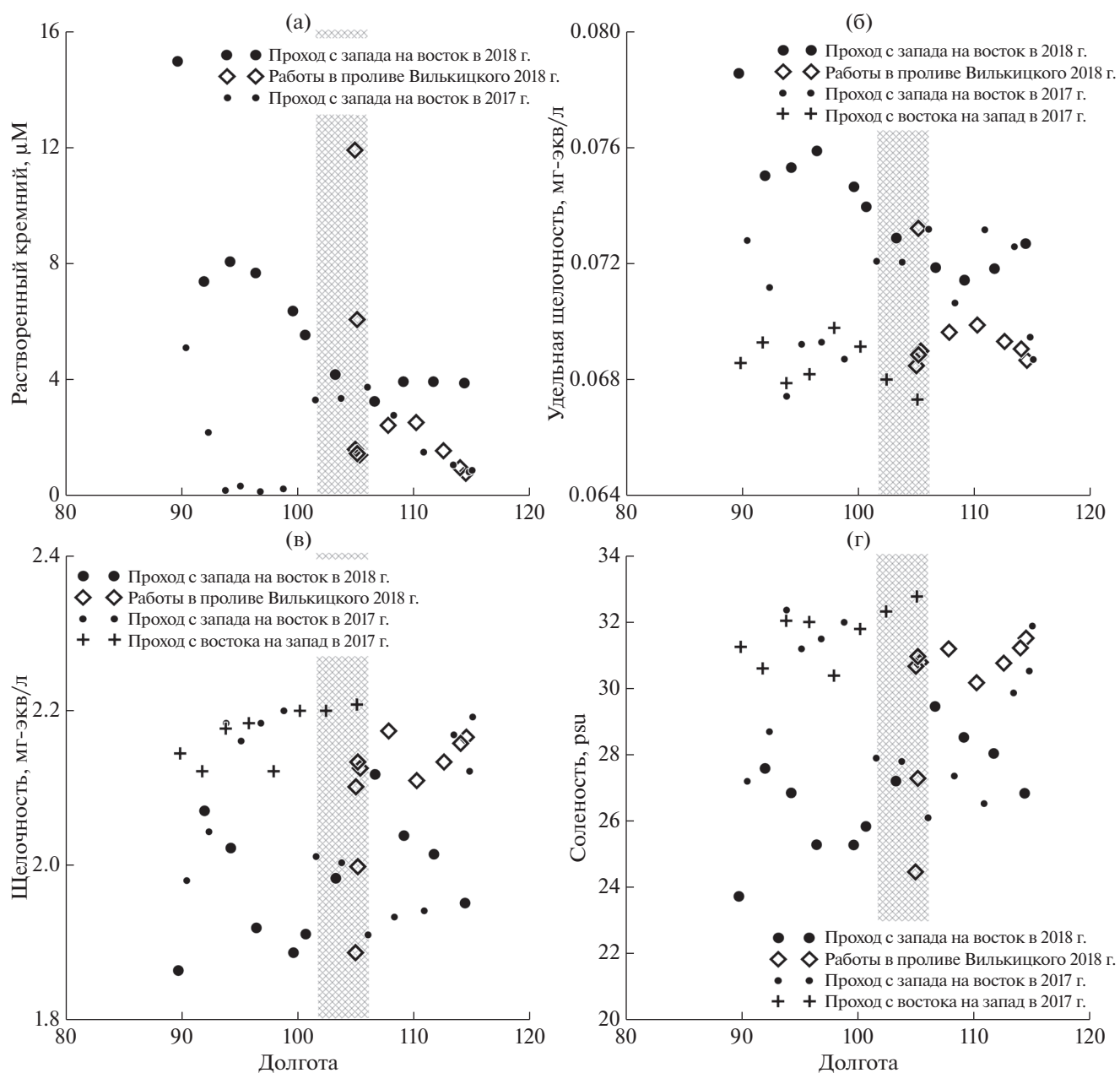
Несмотря на общее сходство гидрохимической структуры, по абсолютным содержаниям гидрохимических параметров воды станции у берегов п-ва Таймыр (ст. № 5974) отличаются от остального разреза. В табл. 1 приведены значения солености и гидрохимических параметров для верхнего слоя основной части разрезов (до горизонта с отрицательной температурой, в среднем до 30 м) и в том же слое на ст. № 5974. Видно, что на ст. № 5974 на поверхности расположены совершенно другие воды, чем на остальной части разрезов.

Повышенное содержание фосфатов и соотношение форм минерального азота показывают, что в водах ст. № 5974 процессы окисления органического вещества начались раньше, чем на других станциях разреза. Об этом свидетельствует и по-

нижение величины рН и содержания растворенного кислорода в водах ст. № 5974. Можно заключить, что такое отличие вод могло быть следствием влияния материкового стока в южной части разреза у берегов п-ва Таймыр. Помимо величины УЩ здесь отмечено и значительное повышение содержания растворенного кремния, понижение общей титруемой щелочности и повышенное значение парциального давления  $\text{CO}_2$ , что в общем характерно для вод материкового стока (главным образом речных вод). Понижение солености в поверхностных водах на других станциях разрезов вызваны, скорее всего, талыми водами или атмосферными осадками. По зависимости величины общей щелочности и содержания растворенного кремния от солености, к сожалению, не удастся достоверно установить источник пресных вод, хотя этот метод и успешно показал себя в Карском море [8, 13, 19]. На рис. 5 видно, что сложно однозначно выделить один источник пресных вод, принимавших участие с трансформации вод.

**Таблица 1.** Величины гидролого-гидрохимических характеристик в верхнем слое морской воды в проливе Вилькицкого (лето 2018 г.)

Станции	S, psu	O <sub>2</sub> , мл/л	pH, NBS	Alk, мг-экв	PO <sub>4</sub> , $\mu\text{M}$	Si, $\mu\text{M}$	NO <sub>2</sub> , $\mu\text{M}$	NO <sub>3</sub> , $\mu\text{M}$	NH <sub>4</sub> , $\mu\text{M}$
5966–5973	30.68	7.90	8.18	2.135	0.16	2.01	0.01	0.25	0.74
5974	24.47	7.58	8.07	1.916	0.22	10.64	0.07	0.73	0.95



**Рис. 6.** Распределение в поверхностных водах на подходе к проливу Вилькицкого содержания растворенного кремния (а), величины удельной щелочности (б), общей щелочности (в) и солености (г). Залив отмечен штриховкой.

Первое, что обращает на себя внимание это то, что точки зависимости  $\text{Alk}/\text{S}$  для поверхностных вод разреза от устья р. Хатанга в сторону открытого моря, выполненного во время экспедиции НИС “Академик Мстислав Келдыш” летом 2017 г., лежат практически на одной линии с результатами работ в проливе в 2017 и 2018 гг. Несколько хуже проявляется линейная зависимость для отношения  $\text{Si}/\text{S}$ . Но проникновение вод из приустьевого района р. Хатанга, по литературным данным, считается маловероятным [12, 18]. Отношение

$\text{Alk}/\text{S}$  и  $\text{Si}/\text{S}$  для вод речного стока 4-х наиболее крупных рек региона имеют слишком большой “разброс”, что связано с сильной неоднородностью состава вод химического стока рек в зависимости от сезона, объема стока и, наконец, межгодовой изменчивости состава стока [2]. Это не позволяет применить регрессионный анализ для выяснения происхождения вод. Кроме того, воды наиболее значимых рек региона по своему пути к проливу должны были в значительной степени трансформироваться, что также затрудняет их выделение.

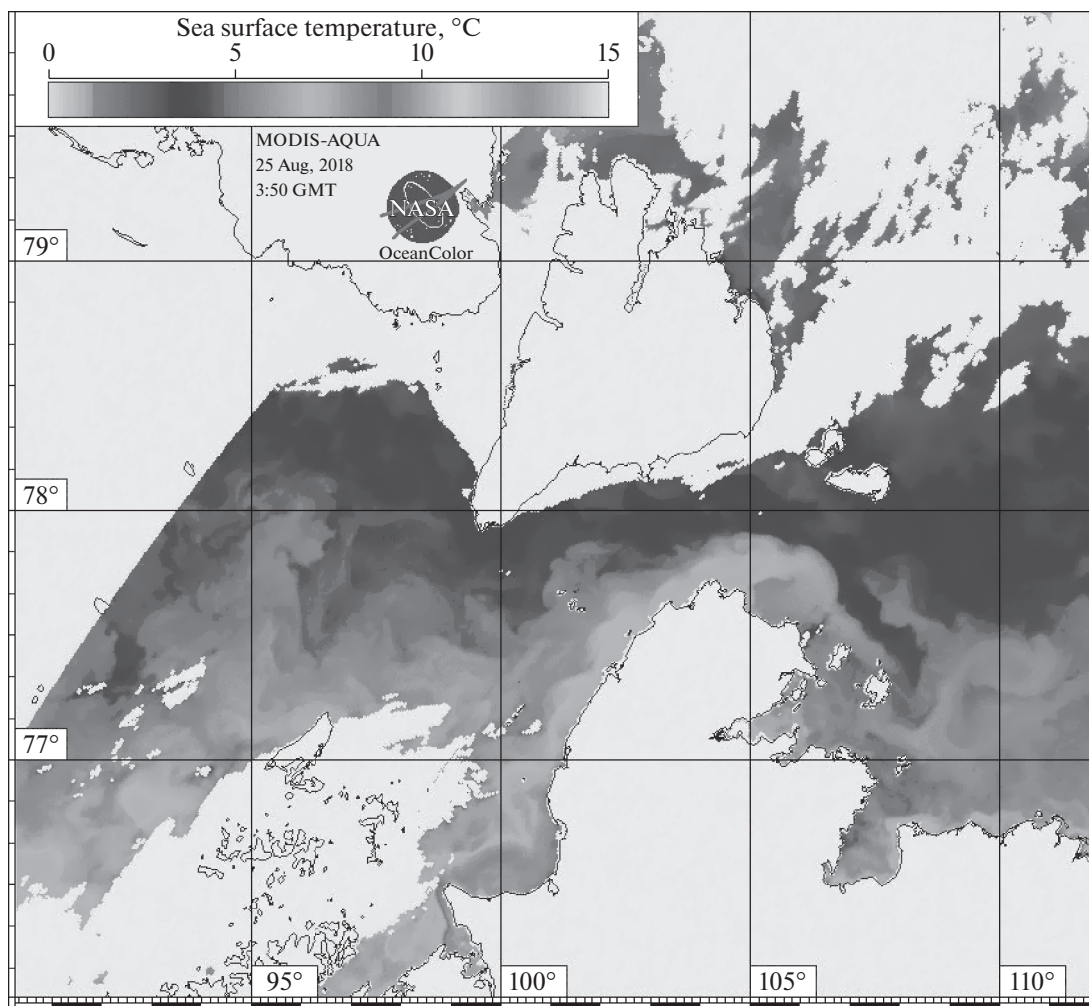


Рис. 7. Температура поверхностных вод по спутниковым данным на 25.08.2018 г.

Можно рассмотреть результаты отбора проб с поверхности при движении судна через пролив в 2017 и 2018 гг. (рис. 6). Видно, что при приближении к заливу со стороны Карского моря в 2018 г. отчетливо наблюдалось уменьшение содержания растворенного кремния и удельной щелочности. С восточной стороны от залива данные величины либо менялись незначительно, либо продолжали тенденцию к падению. Для величин Alk и солёности воды можно отметить только некоторую тенденцию к росту на восток от залива. При работах 2017 г. не наблюдалось какого-либо направленного изменения всех этих величин при приближении к проливу. Но, во всяком случае, нет никакого свидетельства поступления вод с пониженной солёностью и повышенным содержанием силикатов со стороны моря Лаптевых ни в 2018 г., ни в 2017 г. Напротив, эти воды с отчетливыми следами материкового стока вполне могли быть принесены из Карского моря.

Это подтверждается еще и тем, что спутниковые карты распределения поверхностной температуры и взвешенного вещества в Карском море и море Лаптевых (рис. 7) наглядно иллюстрируют “восточный” тип распространения поверхностного опресненного слоя по акватории Карского моря в этот год. Хорошо видно проникновение вод Карского моря вдоль южного берега пролива Вилькицкого в море Лаптевых. Экспедиционные исследования 2018 г. проводились в условиях так называемого “восточного” типа распространения поверхностных опресненных речным стоком вод, вполне оправдано, что поверхностные воды на ст. № 5974 пришли с запада и воды обско-енисейского происхождения прослеживались в районе пролива Вилькицкого. В то же время при работах в 2017 г. в большей степени можно предполагать “центральный” тип переноса вод, и, соответственно, воды Обско-Енисейского района не могли проникнуть к проливу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Считается, что северо-западная часть моря Лаптевых не испытывает влияния рек, и ее гидрохимическая структура формируется под влиянием водных масс, поступающих из Арктического бассейна. Тем не менее, в научной литературе есть сведения, что иногда на эту часть моря распространяется влияние речного стока из Карского моря через пролив Вилькицкого [1, 16, 20].

Во время работ в 2018 г. нами было установлено вероятное присутствие вод Карского моря в проливе Вилькицкого около побережья п-ова Таймыр. Присутствие трансформированных речных вод отмечено только в южной части пролива. Пробы поверхностной воды, отобранные по ходу судна при проходе пролива, показывают, что эти воды в пониженной солености и высокими величинами удельной щелочности пришли с запада. Это связано с тем, что в 2018 г. наблюдался так называемый, “восточный перенос” вод из Карского моря в море Лаптевых с прибрежным течением вдоль берега. Небольшое снижение солености в северной части, у берегов о. Большевик связано, скорее всего, с таянием льда.

В 2017 г. вод со следами присутствия материкового стока в проливе не наблюдалось, в этот год по акватории Карского моря преобладал, скорее всего “центральный” тип переноса вод.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема № 0149-2019-0008 (сбор данных), а также при поддержке РФФИ, проекты № 18-05-60302 “Комплексные исследования эволюции материкового стока в акватории Арктических морей России” и № 18-05-60069 “Пелагические экосистемы морей Сибирской Арктики в условиях современных климатических изменений: структура, продуктивность, потоки вещества”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйневич А.Г., Русанов В.П., Смагин В.М. Распространение речных вод в море Лаптевых по распределению гидрохимических элементов // Тр. ААНИИ. 1980. Т. 358. С. 116–125.
2. Воронков П.П. Гидрохимия местного стока Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1970. 187 с.
3. Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983, 160 с.
4. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
5. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. Поверхностный опресненный слой вод в Карском море // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 730–739.
6. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Кубряков А.А. и др. Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 502–513.
7. Маккавеев П.Н. Влияние материкового стока на гидрохимический режим Карского моря. / Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований. Материалы научной конференции. М.: ООО “АПР”, 2015. С. 50–53.
8. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А., Хлебонашев П.В. О выделении вод Оби и Енисея в распресненных линзах Карского моря. // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 740–747.
9. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: Прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
10. Мокиевский В.О., Цетлин А.Б., Сергиенко Л.А. и др. Экологический Атлас. Карское море. Серия: “Атласы морей Российской Арктики” / М.: ООО “Арктический Научный Центр”, 2016. 272 с.
11. Мокиевский В.О., Цетлин А.Б., Сергиенко Л.А., и др. Экологический Атлас. Море Лаптевых. Серия: “Атласы морей Российской Арктики”. М.: ООО “Арктический Научный Центр”, 2017. 303 с.
12. Пивоваров С.В. Химическая океанография Арктических морей России. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. 86 с.
13. Полухин А.А., Маккавеев П.Н. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–37.
14. Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.242-92. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 264 с.
15. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Ред. Сапожников В.В. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
16. Русанов В.П., Яковлев Н.И., Буйневич А.Г. Гидрохимический режим Северного Ледовитого океана // Тр. ААНИИ. 1979. Т. 355. 144 с.
17. Смагин В.М., Бердников С.В., Пивоваров С.В. Исследования гидрохимической структуры и моделирование экологических последствий антропогенной деятельности в Карском море // Тезисы докладов на российско-норвежском рабочем совещании 28 февраля–2 марта 1995. Санкт-Петербург, ААНИИ, 1995. С. 16.
18. Смирнов А.А. Проникновение речных вод в Карское море и море Лаптевых // Труды Арктического Научно-исследовательского института. Л.: Морской транспорт, 1955. Т. 72. Вып. 2. С. 92–104.
19. Стунжас П.А. Разделение вод Енисея и Оби в Карском море по щелочности и кремнию // Океанология, 1995. Т. 35. № 2. С. 215–219.
20. Carmack E., Winsor P., Williams W. The contiguous panarctic Riverine Coastal Domain: A unifying concept // Progress in Oceanography. 2015. V. 139. P. 13–23.



## Transport of Continental Runoff Through the Vilkitskiy Strait in September 2017 and 2018

P. N. Makkaveev<sup>a, #</sup>, A. A. Polukhin<sup>a, ##</sup>, S. A. Shchuka<sup>a</sup>, S. V. Stepanova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: makkaveev55@mail.ru*

<sup>##</sup>*e-mail: polukhin@jcean.ru*

It is believed, that the waters of the rivers flowing into the Kara Sea (mainly the discharge of the Yenisei and Ob rivers) can propagate to the east, penetrating the Laptev Sea with a current along the coast. This can occur with the so-called “eastern transfer” of continental runoff. During the cruise of R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in 2018, traces of riverine waters were discovered in the Vilkitskiy Strait. Hydrochemical data with great confidence suggest that these waters were transferred from the Ob-Yenisei estuary region. This is due to the fact that in 2018 a pronounced “eastern transfer” of water from the Kara Sea to the Laptev Sea was observed. A year earlier, continental runoff was not observed in the strait. The fact that transformed riverine waters were brought into the strait from the Kara Sea is also shown with the results of surface sampling along the vessel course.

**Keywords:** Kara Sea, Vilkitskiy Strait, continental runoff, water transfer, alkalinity, silicon