



УДК 551.465(268.45)(268.52)

ББК 26.221.375(912)

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2023-1-1-59-68>

Некоторые особенности термохалинных процессов в прибрежной зоне арктических морей

Лукьянов С.В.¹✉, Карсаков А.Л.², Аверкиев А.С.¹,
Татаренко Ю.А.¹, Смирнов Ю.Ю.^{1,3}

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», Санкт-Петербург, Россия

² Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО»
(«ПИНРО» им. Н.М. Книповича), Мурманск, Россия

³ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия
✉ serg_lux@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ особенностей термохалинных процессов в арктической прибрежной зоне морей России на примере отдельных участков Баренцева и Карского морей. В частности, выбраны Медынско-Варандейский участок и приустьевое взморье Оби и Енисея. Для сравнения с термохалинными характеристиками открытого моря использованы данные наблюдений рейсов летом — осенью 2014 г. на океанографическом исследовательском судне (ОИС) «Адмирал Владимирский» и летом — осенью 2019 г. на научно-исследовательском судне (НИС) «Профессор Мультиановский» («Трансарктика 2019»). Основной целью выполненного исследования является получение типовых и экстремальных распределений гидрологических характеристик для оценки потоков тепла и соли в придонных слоях. Характерные потоки субстанций могут быть применены в расчетах потоков в донных отложениях, которые существенно влияют на процессы оттаивания многолетнемерзлых пород. Такие породы являются новым источником полезных ископаемых в Арктической зоне. Для расчетов потоков тепла и соли необходимо получать информацию с высоким пространственным разрешением. Имеющихся данных может быть недостаточно, и необходимы комплексные океанологические наблюдения в прибрежной зоне.

Ключевые слова: прибрежная зона арктических морей, океанологические характеристики

Для цитирования: Лукьянов С.В., Карсаков А.Л., Аверкиев А.С., Татаренко Ю.А., Смирнов Ю.Ю. Некоторые особенности термохалинных процессов в прибрежной зоне арктических морей. *Арктика и инновации*. 2023;1(1):59–68. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2023-1-1-59-68>

Some features of thermohaline processes in the coastal zone of Arctic seas

Lukyanov S.V.^{1,✉}, Karsakov A.L.², Averkiev A.S.¹,
Tatarenko Yu.A.¹, Smirnov Yu.Yu.^{1,3}

¹ Russian State Hydrometeorology University, Saint Petersburg, Russia

² Polar Branch of FSBI “VNIRO” (“PINRO” named after N.M. Knipovich), Murmansk, Russia

³ FSBI “VNIIOkeanologia”, Saint Petersburg, Russia

✉ serg_lux@mail.ru

Abstract. The thermohaline processes in the Arctic coastal zone of seas in Russia are analyzed on the example of some parts of the Barents and Kara Seas: specifically, the Medynsko-Varandey site and the near-mouth coast of the Ob and Yenisey. For comparison with the thermohaline characteristics of international waters, the authors used observation data obtained by Admiral Vladimirovsky oceanographic research ship in the summer — autumn of 2014 and Professor Multanovsky in the summer — autumn of 2019 (“Transarctica 2019”). The study aims to obtain typical and extreme distributions of hydrological characteristics in order to estimate heat and salt fluxes in the bottom layers. The characteristic substance fluxes can be used in the calculations of fluxes in bottom sediments, which have a significant effect on permafrost thawing. Such sedimentary rocks constitute a new source of minerals in the Arctic zone. In order to calculate heat and salt fluxes, it is necessary to obtain high spatial resolution data. The available data may be insufficient, thus requiring integrated oceanological observations in the coastal zone.

Keywords: coastal zone, Arctic seas, oceanological characteristics

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Lukyanov S.V., Karsakov A.L., Averkiev A.S., Tatarenko Yu.A., Smirnov Yu. Yu. Some features of thermohaline processes in the coastal zone of Arctic seas. *Arctic and Innovations*. 2023;1(1):59–68. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2023-1-1-59-68>

Введение

Шельфовая зона Баренцева и Карского морей благодаря многочисленным нефтегазовым месторождениям имеет большой запас полезных ископаемых как в береговой, так и в прибрежной зоне. Практически все они расположены в областях многолетнемерзлотных пород (ММП), что значительно затрудняет их разведку, добычу и транспортировку. При этом береговая зона в сочетании с механическим воздействием морских волн при разных уровнях моря подвержена термоабразии. Берега разрушаются и отступают, т.е. происходит трансгрессия моря. В частности, на Печерском участке Баренцева моря в районе Варандея берег отступает по разным оценкам на расстояние от 1 до 4–5 метров год. Происходит оттаивание ММП и на суше вдали от моря, что само по себе является как проблемой в экологическом плане, когда речь идет о сохранении биоразнообразия, так и проблемой из-за значительного усложнения технического

обслуживания критической инфраструктуры при добыче и транспортировке углеводородного сырья. При этом комплексные программы мониторинга прибрежной зоны и берегов выполняются эпизодически по заказу нефтегазовых компаний, эксплуатирующих различные лицензионные участки.

Постоянно действующих стационарных прибрежных станций Росгидромета совсем немного, и все же по ним есть определенный объем статистического материала о характеристиках природной среды. Но этого недостаточно для оценки перспектив сохранения, промерзания или оттаивания многолетнемерзлотных структур. Особенно мало данных по характеристикам в прибрежной зоне моря. Именно там температура и соленость воды имеют большую изменчивость. Там вода быстрее нагревается в теплый период года и остывает в холодный, кроме того, происходит расплескивание вблизи устьевых взморий рек, что влияет на изменение тем-

пературы замерзания. Поэтому для оценки потоков тепла в донных грунтах необходимо проводить специальные натурные исследования.

Результаты

В донных отложениях шельфа Баренцева и Карского морей ММП имеют схожую геологическую структуру. Исходных данных для их картирования не так уж много. Это грунтовые колонки, полученные в ходе исследовательского бурения, и георадарные съемки. Как правило, такие исследования являются частью морских инженерно-геологических изысканий, выполненных по заказу компаний, специализирующихся на разведке и добыче углеводородов. Но некоторая часть работ все же сделана при прямом финансировании научных институтов РАН через различные гранты. В частности, довольно свежая карта распределения ММП на шельфе Баренцева и Карского морей (рис. 1) приводится А.Е. Рыбалко и М.Ю. Токаревым в коллективной монографии 2021 г. под редак-

цией академика А.П. Лисицына «Система Баренцева моря» [1].

По ней видно, что зона ММП тянется широкой многокилометровой полосой вдоль шельфа Печерской части Баренцева моря и материкового побережья Карского моря. При этом талые зоны наблюдаются восточнее о. Колгуев и почти на 300 км на некотором удалении от устья в Обской губе по всей ее ширине. Мощность этих многолетнемерзлых пород достигает 100 м с температурой от -3 до -0,5°C. В ММП шельфовой зоны пробурено десяток скважин. Это подтверждает, что количество исходных данных невелико. Но все же это бесценный материал, т.к. без него вообще невозможно оценить потоки тепла между придонными водами и донным грунтом, а также в самом грунте.

Здесь проблема состоит не только в малочисленности морских экспедиционных исследований, но и в том, что большие научно-исследовательские суда далеко не всегда заходят в прибрежную зону, а еще в том,

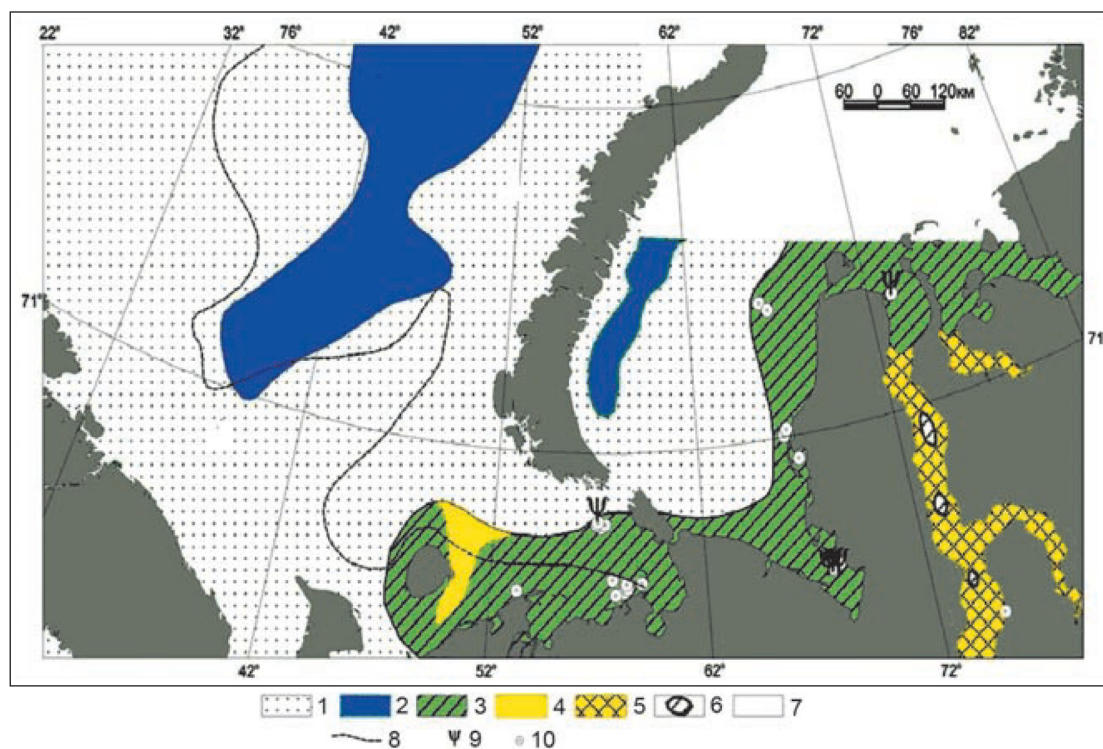


Рис. 1. Карта распространения ММП западно-арктического шельфа РФ (по данным АМИГЭ [2]: 1 — немерзлый грунт; 2 — зона теоретической стабильности газогидратов; 3 — ММП; 4 — талая зона; 5 — талик в Обской губе; 6 — зона потери корреляции (отсутствия отражающих границ); 7 — зона отсутствия сейсмоакустических данных; 8 — изотерма 0 °C; 9 — газ и диапир; 10 — скважина, вскрывшая мерзлый разрез

Fig. 1. Permafrost distribution in the Wester Arctic Russian Shelf (according to AO AMIGE (JSC): 1 — non-frozen sediments, 2 — filterogenic gas hydrate stability zone, 3 — submarine permafrost, 4 - thawed sediments, 5 — Gulf of Ob talik, 6 — wipe-out zone, 7 — zone of absence of seismic data, 8 — zero isothermal line, 9 — observed diapir with gas emission, 10 — wells intersected permafrost

что на мелководье они не ходят вообще. Все же с использованием современных методов обработки и анализа можно построить довольно качественные цифровые карты с распределением океанологических характеристик. В частности, С.В. Писарев при описании гидрологических условий Баренцева моря [3] приводит карты полей температуры и солёности (рис. 2).

Для определения температуры замерзания морской воды необходимо также привлечь данные по распределению солёности (рис. 3, заимствован из [3]).

Примером натурных данных по распределению температуры и солёности являют-

ся материалы многолетних наблюдений на Медыйско-Варандейском участке Печерского моря [5], собранные в один массив, по которому были построены соответствующие карты (рис. 4–8). По ним видно, что наблюдения непосредственно у берега проводились только до горизонта 5 м. Это обусловлено спецификой прибрежной зоны вблизи Варандея, где уклон дна очень маленький и изобата 5 м находится на расстоянии 3–5 км от уреза воды. Вследствие этого берег, разрушаясь все дальше, отступает под механическим воздействием волн и термоабразии, т.к. сложен из мерзлотных пород (см. рис. 1). По разным оценкам скорость этого отступления составляет в среднем 4 км в год [6].

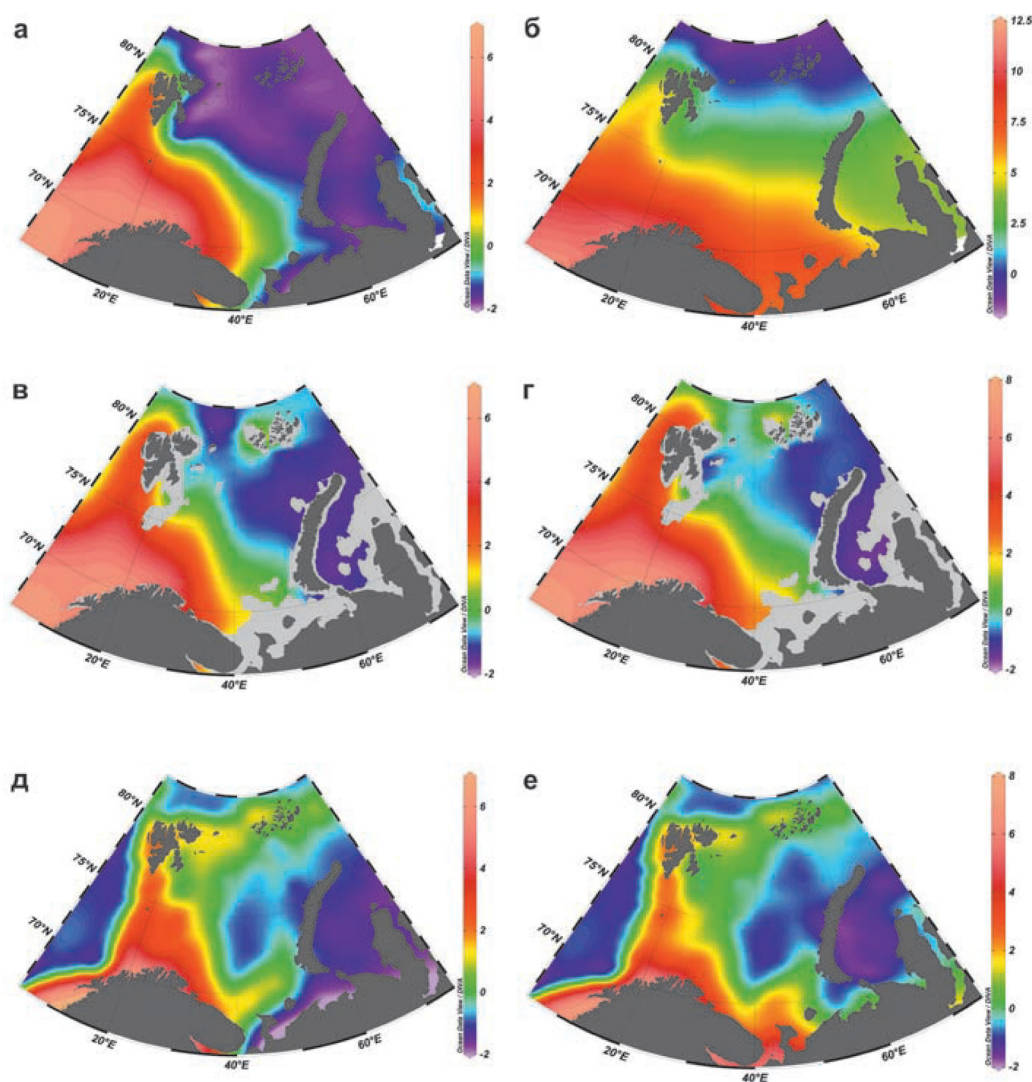


Рис. 2. Температура воды Баренцева моря на горизонтах 0 м (а, б), 100 м (в, г) и у дна (д, е) в зимний (март–май, а, в, д) и летний (июль–сентябрь, б, г, е) сезоны по данным [4] за 2005 г.

Fig. 2. Water temperature of the Barents Sea at 0 m (a, б), 100 m (в, г), and near the bottom (д, е) in winter (March–May, а, в, д) and summer (July–September, б, г, е) for 2005 according to [4]

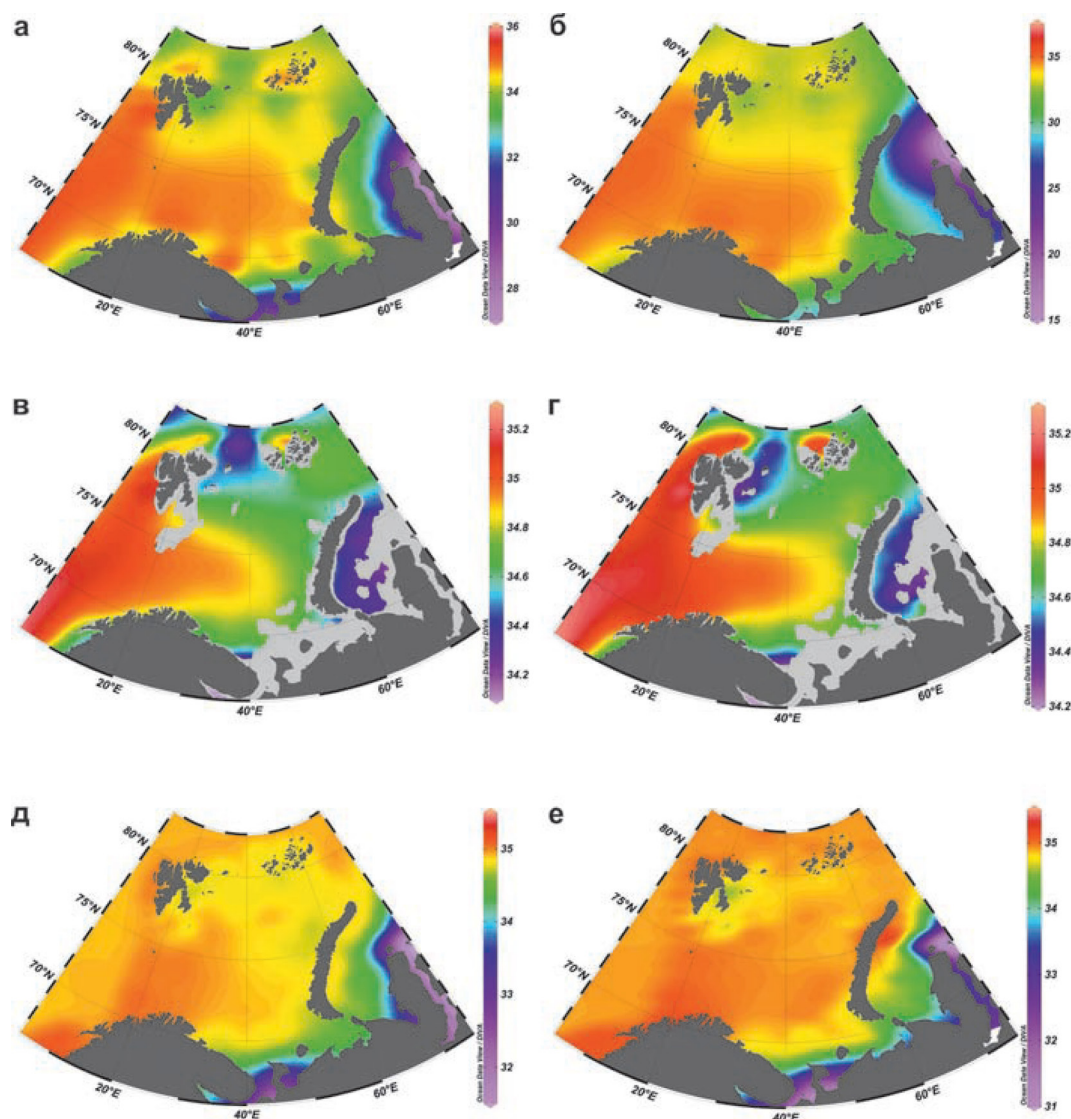


Рис. 3. Соленность воды Баренцева моря на горизонтах 0 м (а, б), 100 м (в, г) и у дна (д, е) в зимний (март–май, а, в, д) и летний (июль–сентябрь, б, г, е) сезоны по данным [4] за 2005 г.

Fig. 3. Salinity of the Barents Sea water at 0 m (а, б), 100 m (в, г) and near the bottom (д, е) in winter (March–May, а, в, д) and summer (July–September, б, г, е) for 2005 according to [4]

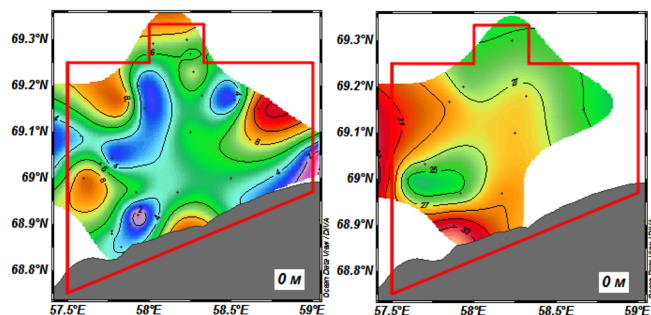


Рис. 4. Распределения температуры (слева) и солёности (справа) на поверхности в августе–сентябре на акватории Медынского-Варандейского полигона

Fig. 4. Temperature (left) and salinity (right) distributions on the water area surface of the Medynsko-Varandey site in August–September

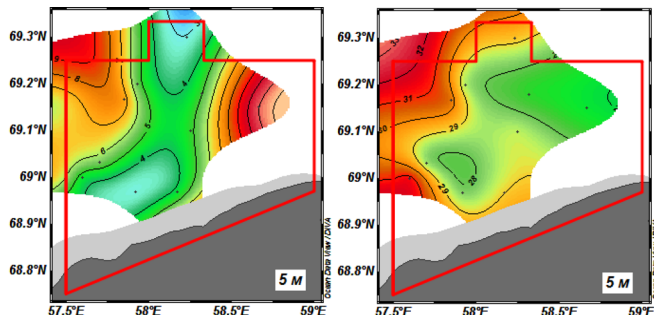


Рис. 5. Распределения температуры (слева) и солёности (справа) на горизонте 5 м в августе–сентябре на акватории Медынского-Варандейского полигона

Fig. 5. Temperature (left) and salinity (right) distributions at 5 m in the water area of the Medynsko-Varandey site in August–September

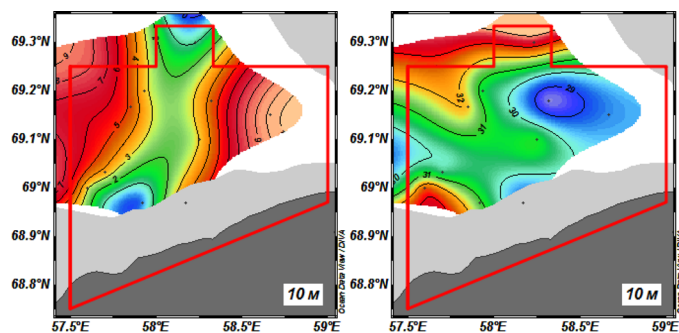


Рис. 6. Распределения температуры (слева) и солености (справа) на горизонте 10 м в августе–сентябре на акватории Медынского-Варандейского полигона

Fig. 6. Temperature (left) and salinity (right) distributions at 10 m in the water area of the Medynsko-Varandey site in August–September

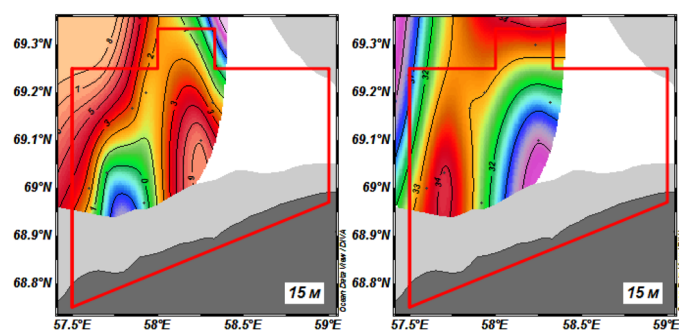


Рис. 7. Распределения температуры (слева) и солености (справа) на горизонте 15 м в августе–сентябре на акватории Медынского-Варандейского полигона

Fig. 7. Temperature (left) and salinity (right) distributions at 15 m in the water area of the Medynsko-Varandey site in August–September

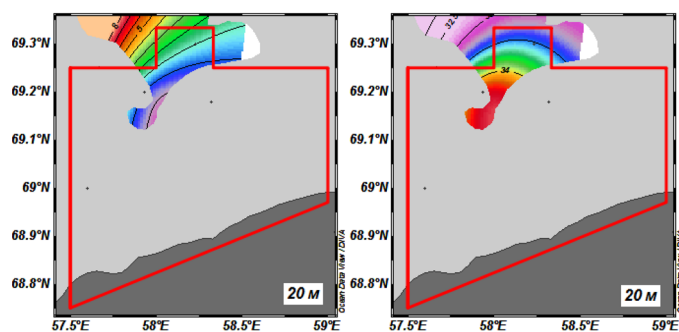


Рис. 8. Распределения температуры (слева) и солености (справа) на горизонте 20 м в августе–сентябре на акватории Медынского-Варандейского полигона

Fig. 8. Temperature (left) and salinity (right) distributions at 20 m in the water area of the Medynsko-Varandey site in August–September

Необходимо заметить, что непосредственно вблизи берега наблюдения за температурой и соленостью проводились, очевидно, с малых плавсредств и всего один раз в 2002 г., когда лицензию на этом участке на геологическое изучение, разведку и до-

бычу углеводородов получило ЗАО «Арктикшельфтегаз». Было выполнено 8 станций. Тем не менее эти данные вполне могут быть использованы для расчетов потоков тепла у дна.

По Карскому морю можно привести данные по температуре и солености рейсов НИС «Профессор Штокман», выполненных в 2014 г. Схема станций представлена на рисунке 9 [7].

Как видно, в прибрежном районе на юго-западе и в Обской губе сетка наблюдений довольно подробная. В данном случае нас интересуют данные по Обской губе, где в зоне ММП имеются обширные участки их оттаивания (рис. 1). Обзор термохалинных условий по результатам наблюдений 128-го рейса НИС «Профессор Штокман» сделали С.А. Щука и др. [7]. Разрезы по температуре и солености вдоль Обской губы (рис. 10) позволяют проследить в придонном слое заток холодных и соленых морских вод вверх по реке, так называемый «соленостный клин». В межень он может распространяться на расстояние более 300 км. Характерно, что температура воды у дна отрицательная, но за счет высокой солености она может быть выше температуры замерзания, что вполне может формировать зоны оттаивания в донных ММП.

Следует заметить, что на устьевом взморье при распространении и постепенном осолонении речных вод формируются так называемые речные плюмы. При этом осолонение благодаря очень большой разнице в плотности морских и уже солоноватых вод происходит очень медленно. Формируются условия для отрыва масс воды от этих плюмов, что обуславливает появление отдельных линз почти пресной воды. Они начинают вращаться и распространяются далеко от берега [8].

Горизонтальное распределение температуры и солености воды в Карском море представлено на рисунках 11, 12 по данным рейса НИС «Профессор Мультановский» («Трансарктика 2019»), в котором принимали участие сотрудники и студенты РГГМУ.

По ним видно, что отрицательные температуры воды на поверхности расположены в более высоких широтах, а у дна, как ни странно, в значительной степени ближе к южному побережью. Возможно,

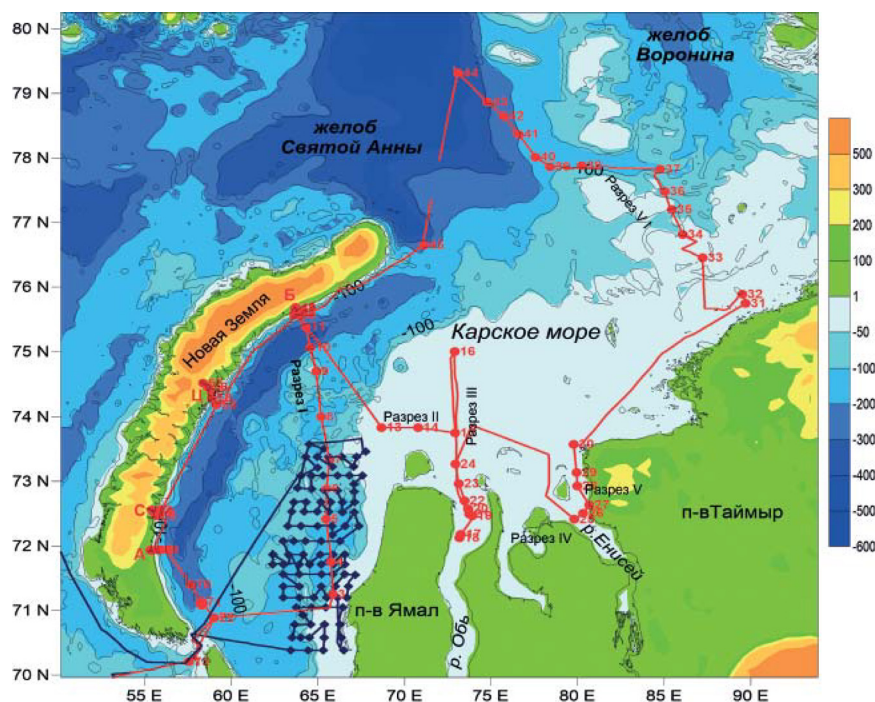


Рис. 9. Карта гидрофизических станций и попутных измерений поверхностной температуры и солености. Красный — 128-й рейс НИС «Профессор Штокман», синий — 129-й рейс НИС «Профессор Штокман». 2014 г. [7]

Fig. 9. Map of hydrophysical stations and along-route measurements of surface temperature and salinity. Red — 128th survey cruise of Professor Shtokman; blue — 129th survey cruise of Professor Shtokman; 2014 [7]

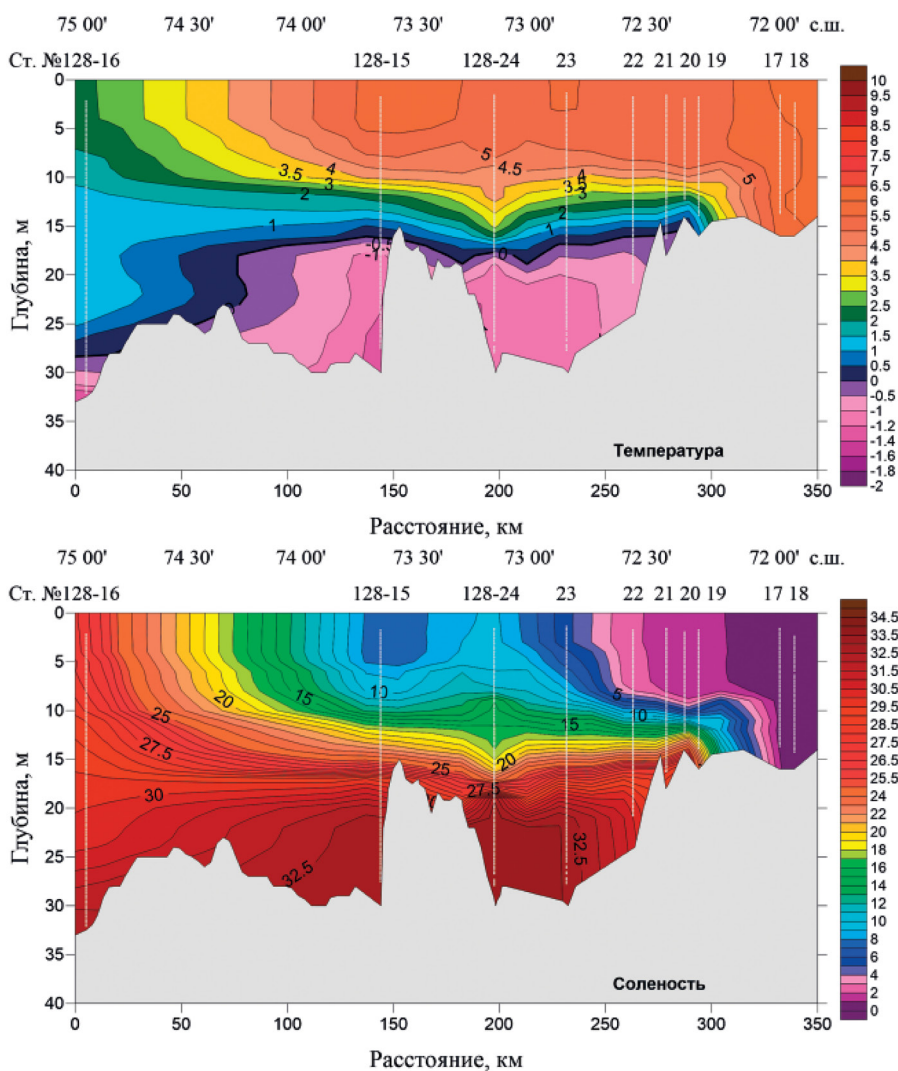


Рис. 10. Разрезы по температуре и солености в Обской губе

Fig. 10. Temperature and salinity cross-sections in the Gulf of Ob

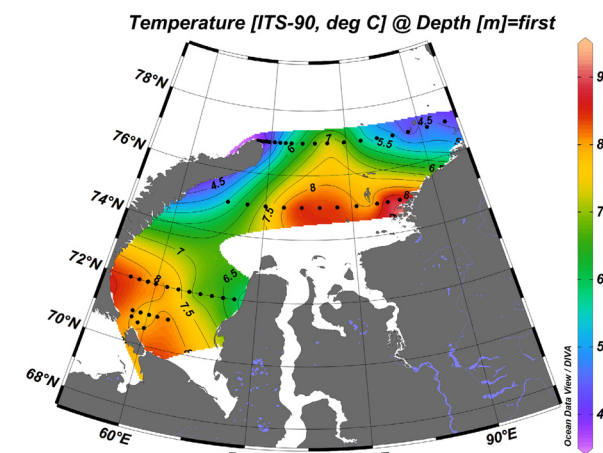


Рис. 11. Горизонтальное распределение температуры воды на поверхности в Карском море в сентябре 2019 г.

Fig. 11. Horizontal distribution of water temperature on the Kara Sea surface in September 2019

последнее определяется высокой вертикальной стратификацией за счет речного стока, препятствующей перемешиванию.

Распределения солёности на поверхности и у дна по материалам того же рейса экспедиции «Трансарктика 2019» представлены на рисунках 13 и 14.

Как видно, распресненный слой на поверхности распространяется практически до мыса Желания, северной оконечности Новой Земли, имея солёность более чем на 10–15 ‰ меньше поверхностных вод Карского моря как на севере, так и в его юго-западной части. Завихренных линз распре-

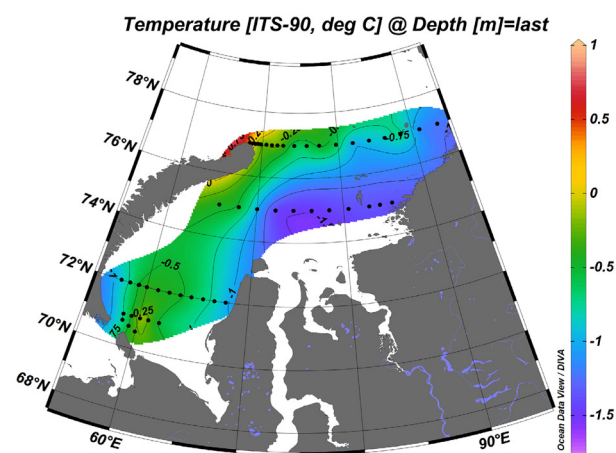


Рис. 12. Горизонтальное распределение температуры воды у дна в Карском море в сентябре 2019 г.

Fig. 12. Horizontal distribution of water temperature near the Kara Sea bottom in September 2019

сненной воды при такой сетке станций выявить не получилось. Аналогичный шлейф распресненных вод присутствует и у дна. При этом и на поверхности, и у дна на самом деле наблюдаются два шлейфа: очень обширный от Оби и меньшей площади Енисея. Но на поверхности обский шлейф распространяется дальше на север, у дна наоборот — от Енисея еще севернее, чем от Оби на поверхности. Возможно, это обусловлено особенностями рельефа дна, хотя в поле температуры таких различий нет.

Для расчетов потоков тепла между водой и донными отложениями необходимо привлечь данные по температуре придонных

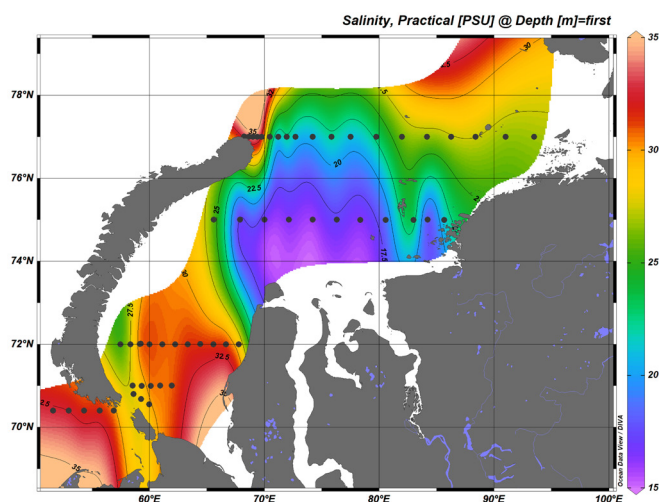


Рис. 13. Горизонтальное распределение солёности воды на поверхности в Карском море в сентябре 2019 г.

Fig. 13. Horizontal distribution of water salinity on the Kara Sea surface in September 2019

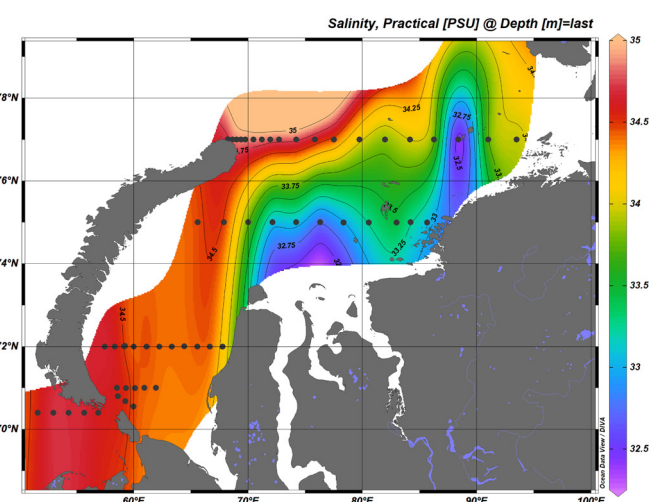


Рис. 14. Горизонтальное распределение солёности воды у дна в Карском море в сентябре 2019 г.

Fig. 14. Horizontal distribution of water salinity near the Kara Sea bottom in September 2019

слоев на шельфе, также используемых в качестве верхнего граничного условия для задачи по промерзанию осадка («задачи Стефана») одномерного уравнения теплопроводности вида:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где ρ , C и λ_e — плотность, теплоемкость и теплопроводность морских отложений соответственно. Такие расчеты для некоторых районов арктического шельфа выполнили Ю.Ю. Смирнов и коллеги [9]. Но они также нуждаются в детализации. При этом температура у дна должна быть получена отдельными расчетами из решения уравнения турбулентной теплопроводности, что при наличии высокой вертикальной стратификации за счет речного стока вынуждает также решать и задачу о турбулентной диффузии соли.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для первичных оценок придонных потоков тепла и соли в придонных слоях в районах шельфовых ММП некоторое коли-

чество данных имеется. При этом еще необходимо привлечь измерения вертикальных профилей скорости и направления течений, которые также выполнялись, но в данной работе не анализировались. Без них трудно определить турбулентные потоки субстанций. Хотя можно привлечь характеристики турбулентного обмена на основе верифицированных математических моделей, которые есть. Но они сами были верифицированы на основе натурных наблюдений. Вот только на основе каких наблюдений и где. При этом динамика вод в исследуемых районах различна. В частности, если в прибрежной зоне Варандея на мелководье вода по вертикали хорошо перемешана, то в придонных слоях Обской губы этому препятствует заток морских вод.

Благодарности

Авторы признательны профессору А.Е. Рыбалко за ценные консультации и многолетнее сотрудничество.

Acknowledgments

The authors are grateful to Professor A.E. Rybalko for valuable consultations and many years of cooperation.

Список литературы

1. Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю. Особенности строения ледниковых образований и связанных с ними форм донного рельефа по данным сейсмоакустического профилирования и их роль в решении дискуссионных вопросов формирования четвертичного покрова Баренцева моря. В: Лисицын А.П., ред. Система Баренцева моря. Москва: ГЕОС; 2021, с. 25–43. [https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/\(5\)](https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/(5))
2. Локтев А.С. Инженерно-геологические изыскания в районах распространения ММП на Арктическом шельфе. В: Труды 11-й Международной конференции по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Off shore 2013), Санкт-Петербург, 10–13 сентября 2013 г. СПб.: Химиздат; 2013, с. 199–203.
3. Писарев С.В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря. В: Лисицын А.П., ред. Система Баренцева моря. Москва: ГЕОС; 2021, с. 153–166. <https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8>
4. Polar science center Hydrographic Climatology (PHC3.0) [internet]. Available at: <https://odv.awi.de/data/ocean/phc-3o/>
5. Разработка программы гидрометеорологических и ледовых изысканий в районе лицензионного участка «Медынско-Варандейский». Отчет РГГМУ по договору № 96/НИС-13, 14 октября 2013 г.
6. Рыбалко А.Е., Лукьянов С.В., Аверкиев А.С., Карсаков А.Л., Щербаков В.А. Морфолитодинамика берегов в районе лицензионного участка Варандей с учетом гидротермодинамики акватории. В: Арктические берега: путь к устойчивости. Материалы XXVII Международной береговой конференции, Мурманск, 24–29 сентября 2018 года. Мурманск: Мурманский арктический государственный университет; 2018, с. 136–139.

7. Шука С.А., Кременецкий В.В., Недоспасов А.А., Очередник В.В. Характеристика термохалинного режима Карского моря. В: Экосистема Карского моря — новые данные экспедиционных исследований. Материалы научной конференции. Москва: АПР; 2015, с. 23–28.
8. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Кубряков А.А., Станичный С.В., Соловьев Д.М. Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море. Океанология. 2015;55(4):502–513. <https://doi.org/10.7868/So030157415040152>
9. Смирнов Ю.Ю., Семёнова А.А., Щур Н.А., Матвеева Т.В. Прогноз распространения ассоциированных с реликтовой мерзлотой газовых гидратов на шельфе моря Лаптевых. В: Морские исследования и образование (MARESEDU-2020). Труды IX Международной научно-практической конференции. Том I (III). Тверь: ПолиПРЕСС; 2020, с. 70–74.

References

1. Rybalko A.E., Tokarev M.Yu. Features of the glacial formations structure and bottom relief forms related to them according to seismoacoustic profiling data and their role in the decision of discussion issues of the Quaternary sediment cover formation of the Barents Sea. In: Lisitsyn A.P., ed. The Barents sea system. Moscow: GEOS Publ.; 2021, p. 25–43. (In Russ.) [https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/\(5\)](https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/(5))
2. Loktev A.S. Engineering and geological surveys in the areas of MMP distribution on the Arctic shelf. In: Proceedings of the 11th International Conference on Oil and Gas Resources Development of the Russian Arctic and the Continental Shelf of the CIS Countries (RAO/CIS Off shore 2013), St. Petersburg, September 10–13, 2013. St. Petersburg: Khimizdat Publ.; 2013, p. 199–203. (In Russ.)
3. Pisarev S.V. Review of the Barents Sea hydrological conditions. In: Lisitsyn A.P., ed. The Barents sea system. Moscow: GEOS Publ.; 2021, p. 153–166. (In Russ.) <https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8>
4. Polar science center Hydrographic Climatology (PHC3.o) [internet]. Available at: <https://odv.awi.de/data/ocean/phc-3o/>
5. Development of the hydrometeorological and ice survey program in the area of the Medynsko-Varandevsky license area. RSHU Report under Contract No. 96/NIS-13 dated October 14, 2013. (In Russ.)
6. Rybalko A.E., Luk'yanov S.V., Averkiev A.S., Karsakov A.L., Shcherbakov V.A. Morpholithodynamics of the shores in the license site Varandey, taking into account the hydrothermodynamics of the water area. In: Arctic Shores: A Path to Sustainability. Proceedings of the XXVII International Coast Conference, Murmansk, September 24–29, 2018. Murmansk: Murmansk Arctic University; 2018, p. 136–139. (In Russ.)
7. Schuka S.A., Kremenetsky V.V., Nedospasov A.A., Krydnyk V.V. Characterization of the thermohaline regime of the Kara Sea. Ecosystem of the Kara Sea — new data from expeditionary studies. Proceedings of the scientific conference. Moscow: APR Publ.; 2015, p. 23–28. (In Russ.)
8. Zatsepin A.G., Kremenetsky V.V., Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Soloviev D.M. Propagation and transformation of waters of the surface desalinated layer in the Kara Sea. Oceanology. 2015;55:450–460. <https://doi.org/10.1134/s0001437015040153>
9. Smirnov Yu. Yu., Semenova A.A., Shchur N.A., Matveeva T.V. Forecast of the distribution of gas hydrates associated with relict permafrost on the Laptev Sea shelf. In: Marine Research and Education (MARESEDU-2020). Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. Vol. I (III). Tver: Poly PRESS LLC; 2020, p. 70–74. (In Russ.)