

Точность спутниковой солёности NASA/SMAP в районе внешней границы плюма Оби – Енисея (стоковая фронтальная зона) в Карском море

А. А. Кони́к^{1,2}, А. В. Зими́н^{1,2}, О. А. Атаджанова^{1,3}, А. А. Осадчиев¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: konikrshu@gmail.com*

² *Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия*

³ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*

Спутниковые измерения солёности поверхностного слоя моря — один из важных источников информации о гидрофизических процессах в Арктике в безлёдный период. Ряд предыдущих исследований показал, что стандартные алгоритмы восстановления солёности, разработанные и верифицированные для наиболее типичных для Мирового океана термохалинных условий, работают с низкой точностью в случае малых значений температуры и солёности. Подобные условия, в частности, характерны для плюмов арктических рек, которые занимают значительные площади в безлёдный сезон в Северном Ледовитом океане. В настоящей работе проведено сравнение спутниковых данных с натурными измерениями солёности, проведёнными в зоне распространения плюма Оби – Енисея в Карском море в августе и октябре 2021 г. Установлено, что стандартные спутниковые алгоритмы солёности с достаточно высокой точностью описывают поля поверхностной солёности при её значениях больше 18 PSU (*англ.* Practical Salinity Units, практические единицы солёности) и температуре выше 7 °С. Показано, что с помощью кластерного анализа, в основе которого лежат спутниковые измерения солёности, можно получать достоверные физико-географические характеристики стоковой фронтальной зоны в Карском море.

Ключевые слова: спутниковая солёность, NASA/SMAP, натурные измерения, плюм Оби – Енисея, граница плюма, стоковая фронтальная зона, Карское море, Северный Ледовитый океан

Одобрена к печати: 04.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-9-19

Введение

Сложные природно-климатические условия в Северном Ледовитом океане служат причиной существенного недостатка натурных измерений, необходимых для понимания различных гидрофизических и гидробиологических процессов. Кроме того, в последние десятилетия в арктическом регионе наблюдаются существенные климатические изменения, делающие проблему недостатка данных ещё более острой (Ашик, 2021; Vox et al., 2019). Это повышает актуальность использования спутниковых данных для исследования океанологических процессов в безлёдный сезон в различных акваториях Северного Ледовитого океана, особенно с учётом существенного увеличения продолжительности безлёдного сезона (Serreze, Stroeve, 2015). При использовании спутниковых данных особое внимание должно уделяться их достоверности и точности, в частности необходима их качественная валидация относительно натурных измерений (Frey, Osadchiev, 2021).

Сток рек Оби и Енисея играет ключевую роль в формировании гидрологического режима Карского моря, так как плюм Оби – Енисея в безлёдный сезон занимает всю центральную часть моря (Pavlov, Pfirman, 1995; Osadchiev et al., 2021). Область внешней границы плюма Оби – Енисея, которая характеризуется резкими градиентами солёности, в ряде источников называют стоковой фронтальной зоной (СФЗ) (Атаджанова и др., 2018; Кони́к и др., 2021, 2022; Delatolas et al., 2023). В настоящее время для определения положения и характеристик СФЗ используются как судовые наблюдения (Зацепин и др., 2010; Osadchiev et al., 2020, 2023),

имеющие высокую точность и достоверность, так и спутниковые данные (Атаджанова и др., 2018; Глуховец, Гольдин, 2014; Коник и др., 2021, 2022), характеризующиеся хорошим пространственно-временным охватом. В частности, в работе (Коник и др., 2022) на основе спутниковых наблюдений за 2000–2020 гг. были получены оценки сезонной и межгодовой изменчивости характеристик СФЗ как отдельного и важного явления в Карском море.

Спутниковые данные имеют как ряд достоинств (регулярность, стабильное пространственное разрешение, глобальная область покрытия), так и существенные недостатки (зависимость от метеоусловий, необходимость валидации). Зачастую для обработки спутниковых данных требуются специализированные региональные алгоритмы. Это часто относится и к арктическим исследованиям (Копелевич и др., 2006; Glukhovets et al., 2022) из-за низкой точности стандартных алгоритмов, разработанных для типичных условий Мирового океана, которые значительно отличаются от условий в Арктике. В частности, до сих пор не разработаны алгоритмы, которые качественно восстанавливают поверхностную солёность моря при низких температурах (<10 °С) и низких значениях солёности (<25 PSU (*англ.* Practical Salinity Units, практические единицы солёности)) (Kolodziejczyk et al., 2021; Supply et al., 2020) из-за высокой чувствительности яркостной температуры к величине температуры поверхностных вод ниже 10 °С (Meissner et al., 2018). Перечисленные факты легли в основу настоящей статьи, цель которой — оценка качества данных спутниковой солёности в высокоградиентной области СФЗ в Карском море на основе натурных судовых измерений, выполненных в августе и октябре 2021 г.

Данные и методы

Для идентификации СФЗ в Карском море по спутниковым данным были использованы суточные и среднемесячные радиометрические измерения солёности поверхности моря (СПМ) NASA/SMAP (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США/*англ.* Soil Moisture Active Passive) за август и октябрь 2021 г. с пространственным разрешением 0,25° (Meissner et al., 2018). Для верификации спутниковой солёности использовались измерения поверхностной солёности, проведённые в рамках 58-го рейса научно-исследовательского судна (НИС) «Академик Иоффе» (АИ-58), а также 86-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК-86) в периоды с 11 по 30 августа и с 5 по 24 октября 2021 г. Измерения выполнялись на ходу судна с помощью термосалинографа (SBE21 — *англ.* Sea Bird Electronics), частота работы которого в августе составляла 10 с, а в октябре — 5 с.

На основе спутниковых данных был проведён расчёт горизонтальных градиентов СПМ (Ivshin et al., 2019) на регулярной сетке с шагом 0,25×0,25°. Затем, согласно апробированной ранее методике определения характеристик и положения СФЗ (Коник и др., 2022), объединённый массив спутниковых данных СПМ и рассчитанных градиентов использовался для идентификации фронтальной зоны на поверхности моря.

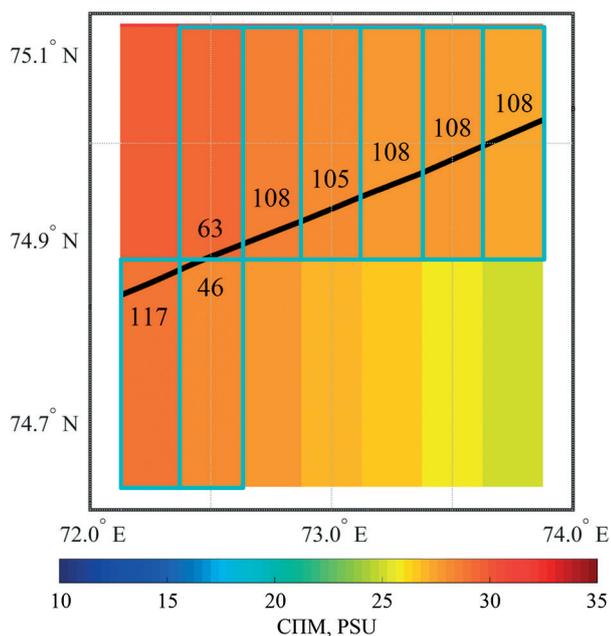


Рис. 1. Спутниковые данные солёности и положение трека судна АИ-58 за 14.08.2021. Цифрами указано число *in situ* измерений, попадающих в область каждой ячейки сетки спутниковых наблюдений

Для проведения валидации спутниковой солёности проводился композитный анализ карт положений СФЗ и судовых треков для определения конкретных дат, в которые попадали точки натуральных наблюдений в районе фронтальной зоны. Для сравнения использовались все *in situ* измерения, попадающие в область одного шага сетки спутниковой солёности (расстояние между натурными и спутниковыми измерениями не более 30 км) за определённые сутки (временной интервал между натурными и спутниковыми измерениями не более 24 ч) (рис. 1, см. с. 10), которые затем были усреднены с присвоением координаты соответствующего узла. В августе среднее количество *in situ* измерений солёности, попадающих на единицу сетки спутниковых данных, составило 190, а в октябре — 600.

Далее на основе полученных рядов была выполнена валидация по методике из работы (Зимин и др., 2020), которая включала в себя количественную оценку соответствия рядов друг другу. Выполнялся регрессионный анализ с расчётом коэффициента детерминации (R^2). Проводился расчёт средних значений (\bar{P}), стандартного отклонения (σ) для каждого ряда, коэффициента корреляции (R), аномалии между рядами, которая представляет собой осреднённый модуль разницы между натурными и спутниковыми значениями солёности в каждой точке (An). Кроме того, рассчитывалась функция расхождения ($F_{\text{расх}}$), которая, согласно классификации, предложенной в работе (Eilola et al., 2009), показывает соответствие рядов друг другу и имеет следующие диапазоны: $0 \leq F < 1$ (хорошее соответствие), $1 \leq F < 2$ (удовлетворительное) и $2 \leq F$ (плохое).

Результаты

Изменчивость характеристик солёности в Карском море

На основе судовых и спутниковых данных были построены композитные карты и графики изменчивости СПМ в Карском море за август и октябрь 2021 г., представленные на рис. 2 (см. с. 12).

Анализ судовых и спутниковых данных за август показывает, что солёность вблизи пролива Карские Ворота, в западной и северной части Карского моря (за 76° с. ш.), не опускалась ниже 30 PSU (см. рис. 2а). При приближении к границе плюма Оби – Енисея на западе и на востоке (75 – 76° с. ш.) солёность в обоих типах данных отличалась незначительно и составляла в среднем 15–20 PSU. В пределах речного плюма разница между данными *in situ* и спутниковой информацией составляла 5–10 PSU (см. рис. 2в), однако на отдельных участках (например, у п-ова Ямал), где солёность возрастала до 18–25 PSU, спутниковые измерения хорошо соотносились с данными натуральных наблюдений. В октябре в юго-западной и северной части Карского моря по данным *in situ* наблюдений солёность составляла 30–31 PSU, в то время как по спутниковым данным её значение достигало 32–33 PSU (см. рис. 2б). В плюме Оби – Енисея солёность по судовым измерениям практически не менялась и в среднем составляла 15 PSU (см. рис. 2г), а по спутниковым данным в этой области наблюдался большой размах колебаний солёности в пределах 21–29 PSU. Разница между спутниковыми и *in situ* данными солёности поверхностных вод в плюме Оби – Енисея в октябре могла достигать 10–15 PSU. Стоит также отметить, что в оба месяца спутниковые данные СПМ чаще всего завышены по сравнению с данными судовых измерений.

Таким образом, качественный анализ показал, что NASA/SMAP хорошо воспроизводит величины солёности в Карском море вне пределов плюма Оби – Енисея, а также с достаточной точностью — в области больших градиентов солёности на внешней границе плюма, СФЗ, где средние значения варьируются в пределах 18–25 PSU. Выполнявшаяся ранее валидация (количественная оценка) спутниковой солёности NASA/SMAP по натурным измерениям на гидрологических станциях в работе (Коник и др., 2021) показала её высокую точность в Карском море в сентябре 2019 г. Однако в том исследовании в пределах области СФЗ находилось только 7 измерений солёности, что требует дополнительного рассмотрения возможности применения спутниковых измерений солёности для оценки её количественных характеристик с помощью методов кластерного анализа, описанных в публикациях (Коник и др., 2021, 2022).

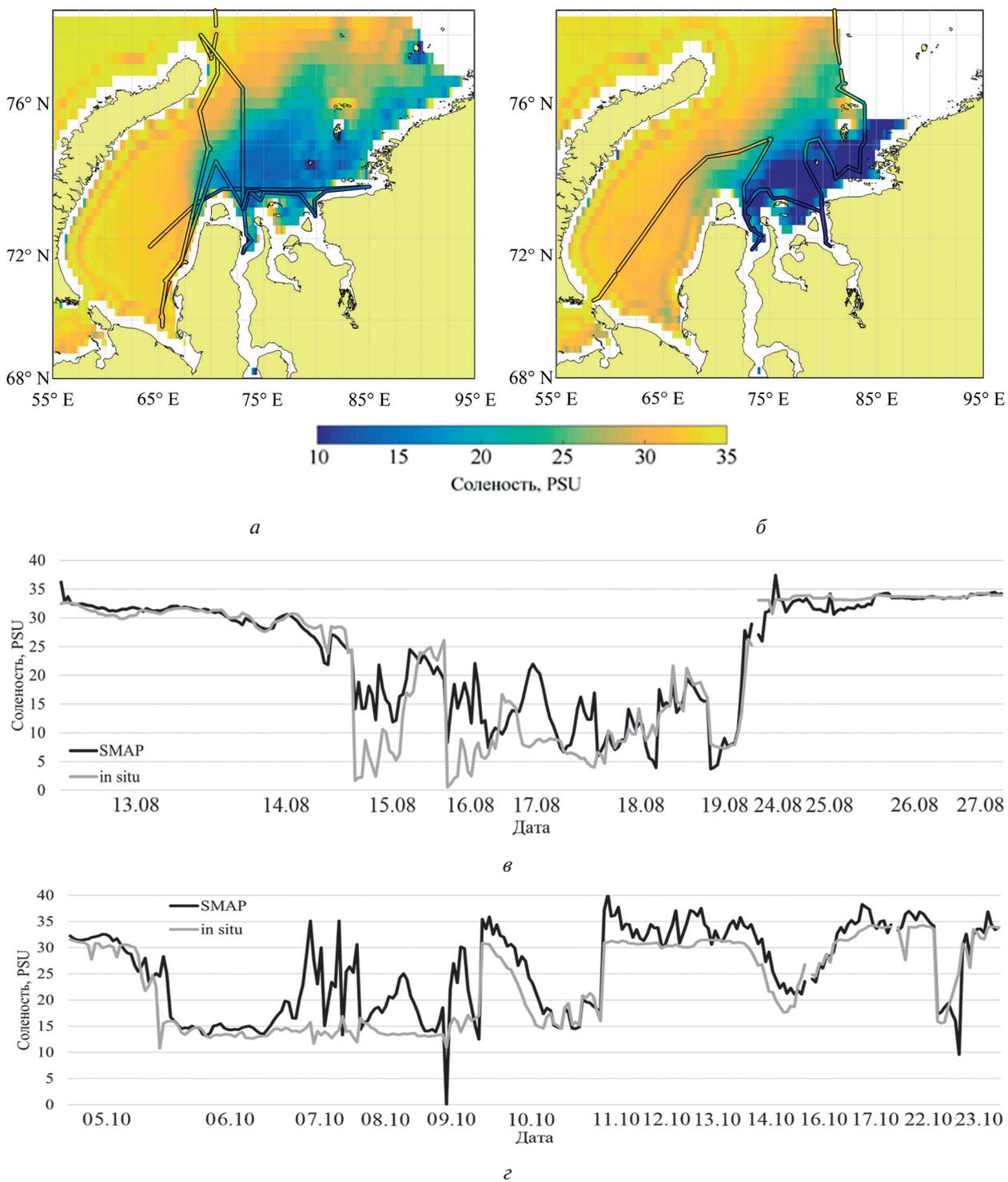


Рис. 2. Композитные карты и графики изменчивости характеристик поверхностной солёности в Карском море по спутниковым и судовым данным в августе (а, в) и октябре (б, г); на картах чёрными линиями показана область натуральных измерений АИ-58 и АМК-86

Изменчивость характеристик солёности в области СФЗ

На основе кластерного анализа были получены среднемесячные физико-географические характеристики СФЗ за август и октябрь 2021 г. Количественные оценки фронтальной зоны за указанный период по спутниковым и судовым данным представлены в *табл. 1*, а её положения совместно с судовыми треками проведённых экспедиций АИ-58 и АМК-86 — на *рис. 3* (см. с. 13).

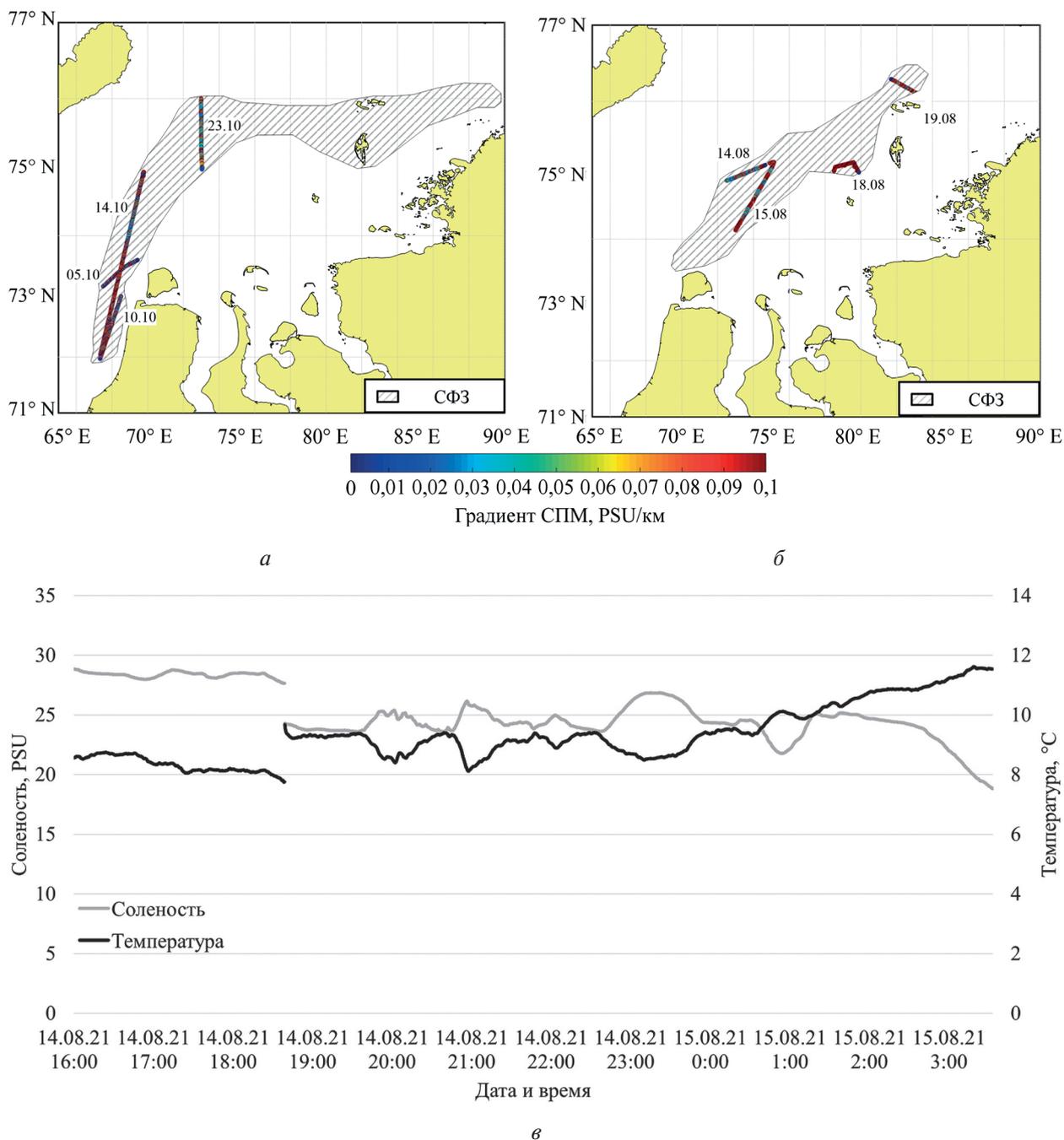


Рис. 3. Положение СФЗ по результатам кластерного анализа и градиентов СПМ, полученных по данным экспедиций АИ-58 и АМК-86, с указанием дат прохода судов через фронтальную зону в 2021 г.: *а* — август, *б* — октябрь; *в* — график изменчивости термохалинных характеристик вод в области СФЗ по данным *in situ* наблюдений за 14–15 августа 2021 г. (время московское)

Таблица 1. Количественные оценки среднемесячных характеристик СФЗ в августе и октябре 2021 г., полученные по данным спутниковых и судовых измерений: \bar{T} — температура; \bar{S} — СПМ; S_d — диапазон минимальных и максимальных значений СПМ; $\nabla\bar{S}$ — градиент СПМ.

Месяц	Вид	\bar{T} , °C	\bar{S} , PSU	S_d , PSU	$\nabla\bar{S}$, PSU/км
Август	SMAP	—	22,8	18–27	0,12
	<i>in situ</i>	7,2	23,6	15–28	0,10
Октябрь	SMAP	—	24,8	22–29	0,12
	<i>in situ</i>	3,1	21,1	10–30	0,11

Количественные оценки среднемесячных характеристик СФЗ, полученные по данным спутниковых наблюдений (см. табл. 1), показали, что величина солёности вод в области фронтальной зоны на поверхности в августе составляет 22 PSU, в то время как в октябре — 24 PSU. Диапазон изменчивости солёности в летний период варьируется от 18 до 27 PSU, а в осенний месяц колеблется в интервале 22–29 PSU. Среднемесячное значение градиента СПМ в течение двух рассматриваемых месяцев не меняется и составляет 0,12 PSU/км, что в среднем выше среднего многолетнего градиента СФЗ на 0,02 PSU/км (Коник и др., 2022). По судовым наблюдениям температура вод на поверхности в области СФЗ (см. табл. 1) составляла 7,2 °C в августе и 3,1 °C в октябре. Средние значения солёности внутри фронтальной зоны варьировались от 21 PSU в октябре до 23 PSU в августе, при этом диапазон изменчивости минимальных и максимальных значений солёности летом составил 15–28 PSU, а осенью — 10–30 PSU. Среднее значение градиента солёности в течение двух рассматриваемых месяцев составляет 0,11 PSU/км.

Из рис. 3а, б видно, что в августе СФЗ располагается в центральной части Карского моря, занимая акваторию от о. Белый до арх. Известий ЦИК. В октябре СФЗ была вытянута дальше в северном и западном направлении в центральной части Карского моря. Важно отметить, что области максимальных градиентов СПМ, полученные по *in situ* наблюдениям, соотносятся с положением СФЗ, выделенной с помощью кластерного анализа. На основании анализа композитных карт (см. рис. 3а, б) положения СФЗ и судовых треков удалось установить, что во время экспедиции АИ-58 судно пересекало СФЗ 14, 15, 18 и 19 августа, а во время экспедиции АМК-86 — 5, 10, 14 и 23 октября.

В качестве примера на рис. 3в представлена внутренняя структура СФЗ по данным *in situ* наблюдений за 14–15 августа. Видно, что инструментальные значения солёности в СФЗ варьируются от 18 до 28 PSU, а температура — от 8 до 12 °C. Фронтальная зона характеризуется многофронтальностью, а её внутренняя структура отличается чередованием более солёных и холодных вод и распреснённых и тёплых вод, что характерно для «перемежающегося» типа фронтальной зоны (Пелевин и др., 2017; Федоров, 1983). Несколько фронтальных разделов внутри СФЗ регистрируются в 20:00, 21:00, 22:00 и 23:00 14 августа и 01:00 15 августа, где максимальный горизонтальный градиент солёности варьировался от 0,12 до 0,15 PSU/км.

В результате осреднения *in situ* наблюдений солёности (расстояние до узлов сетки спутниковых данных — не более 30 км, а шаг по времени — не более 24 ч) за август (14, 15, 18 и 19) и за октябрь (5, 10, 14 и 23) на область, которая соответствовала спутниковым данным, для дальнейшей валидации было отобрано 21 значение за август и 22 значения за октябрь, которые попадали в область СФЗ.

Валидация солёности в области СФЗ

Результаты регрессионного анализа спутниковых и контактных данных поверхностной солёности в области фронтальной зоны за август и октябрь 2021 г. представлены на рис. 4 (см. с. 15). Видно, что в августе эллипс рассеяния облака точек вырожден в прямую линию, что позволяет говорить о функциональной связи между судовыми и спутниковыми данными. Это также подтверждается достаточно высоким коэффициентом детерминации ($R^2 > 0,7$).

В октябре облако точек значений поверхностной солёности значительно рассеяно от основной линии тренда, что говорит о случайной связи двух переменных, и характеризуется малой величиной коэффициента детерминации ($R^2 < 0,3$).

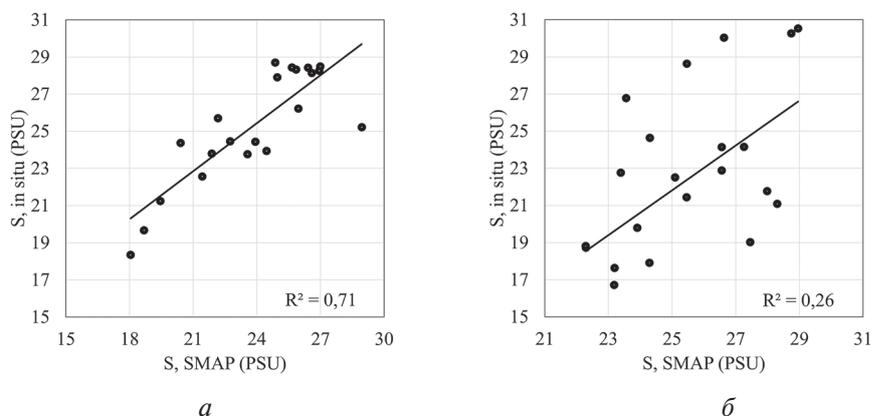


Рис. 4. Результаты расчёта линейной регрессии спутниковых и *in situ* измерений солёности: а — август, б — октябрь; R^2 — коэффициент детерминации

Более подробный анализ характеристик СПМ в октябре 2021 г. на основе статистических критериев для области СФЗ представлен в *табл. 2*. Выполненная валидация за октябрь показала, что данные по спутниковой солёности NASA/SMAP и *in situ* сильно разнятся. Между полученными значениями стандартного отклонения для каждого ряда наблюдается разница более чем в два раза. Аномалия составила более 4 PSU, а корреляция — 0,5, однако функция расхождения при этом невелика (0,63).

Таблица 2. Статистические параметры для сравнительного анализа экспедиционных (*in situ*) и спутниковых (SMAP) данных: \bar{P} — среднее значение солёности, σ — стандартного отклонения; An — аномалия; $F_{\text{расх}}$ — функция расхождения; R — коэффициент корреляции

Месяц/параметр	\bar{P} , PSU		σ , PSU		An , PSU	$F_{\text{расх}}$	R
Октябрь	22,32	25,42	4,95	2,10	4,31	0,63	0,51

Таким образом, результаты валидации показали, что радиометр NASA/SMAP с высокой точностью описывает поля солёности на поверхности в районе СФЗ в августе и с недостаточной точностью — в октябре. Это позволяет сделать вывод о возможности их применения для анализа характеристик поверхностных вод и выделения СФЗ только в наиболее тёплый период летнего сезона.

Заключение

На основе анализа спутниковых и *in situ* данных были оценены среднемесячные физико-географические характеристики внешней границы плюма Оби – Енисея (стоковой фронтальной зоны) за август и октябрь 2021 г. Показано, что на внешней границе плюма Оби – Енисея значения солёности составляли 15–20 PSU в августе и 18–25 PSU в октябре, в то время как в центральной части Карского моря СПМ в течение двух месяцев значительно не менялась и достигала 28–30 PSU. Средняя величина СПМ в области СФЗ по спутниковым данным варьировалась от 22 PSU в августе до 24 PSU в октябре, а по *in situ* измерениям — от 21 PSU в октябре до 23 PSU в августе. Среднемесячный градиент солёности СФЗ, рассчитанный по спутниковым данным, в среднем составил 0,12 PSU/км, а по натурным — 0,11 PSU/км.

На основе анализа судовых измерений установлено, что средняя величина температуры в области фронтальной зоны менялась в пределах от 3 °С в октябре до 7,2 °С в августе. Пространственный анализ положения СФЗ показал, что в оба месяца зона была вытянута вдоль сибирского побережья, а рассмотрение внутренней структуры СФЗ выявило её многофронтальность, которая характеризовалась «перемежающимся» типом изменчивости термохалинных характеристик вод.

На основе интерполированных на спутниковую сетку судовых наблюдений (шаг по времени — не более 24 ч, а по пространству — не более 30 км) была проведена валидация данных СПМ спутника NASA/SMAP в области СФЗ Карского моря. Количественное сопоставление дистанционных и контактных данных для августа показало высокую корреляцию ($R^2 > 0,7$), в то время как для октября отмечалась малая величина коэффициента корреляции ($R^2 < 0,3$). Статистический анализ спутниковых и судовых данных СПМ за октябрь также подтвердил их невысокое качество (весомые различия по среднему, аномалии и функции расхождения). Важно отметить, что во фронтальной зоне в августе при температуре поверхности моря выше 7 °С спутниковые значения СПМ (>18 PSU) близки к *in situ* наблюдениям, однако в октябре при значениях температуры 3 °С измерения спутника NASA/SMAP сильно завышены.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-17-00087 (обработка и анализ натурных данных), а также в рамках государственного задания № FMWE-2021-0014 (обработка и анализ спутниковых данных). Данные натурных измерений получены в 58-м рейсе НИС «Академик Иоффе» в рамках программы «Плавучий университет ИО РАН – МФТИ».

Литература

1. Атаджанова О. А., Зимин А. В., Свергун Е. И., Коник А. А. Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Баренцевом море // Морской гидрофиз. журн. 2018. Т. 34. № 3(201). С. 237–246. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-3-237-246.
2. Ашик И. М. Моря российской Арктики в современных климатических условиях. СПб.: ААНИИ, 2021. 360 с.
3. Глуховец Д. И., Гольдин Ю. А. Исследование биооптических характеристик вод Карского моря с использованием данных спутниковых и судовых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 346–350.
4. Зацепин А. Г., Завьялов П. О., Кременецкий В. В., Поярко С. Г., Соловьев Д. М. Поверхностный опресненный слой в Карском море // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
5. Зимин А. В., Атаджанова О. А., Коник А. А., Гордеева С. М. Сравнение результатов наблюдений, выполненных в Баренцевом море, с данными из глобальных океанологических баз // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2020. Т. 13. № 4. С. 66–77. DOI: 10.7868/S2073667320040061
6. Коник А. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А., Педченко А. П. Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 241–250. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250.
7. Коник А. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А. Пространственно-временная изменчивость характеристик стоковой фронтальной зоны в Карском море в первые два десятилетия XXI века // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2022. Т. 15. № 4. С. 23–41. DOI: 10.48612/fpg/38mu-zda7-dper.
8. Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 99–105.
9. Пелевин В. В., Завьялов П. О., Беляев Н. А. и др. Пространственная изменчивость концентраций хлорофилла “а”, растворенного органического вещества и взвеси в поверхностном слое Карского моря в сентябре // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 183–193. DOI: 10.7868/S0030157417010130.
10. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
11. Box J. E., Colgan W. T., Christensen T. R. et al. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017 // Environmental Research Letters. 2019. V. 14. Article 045010. DOI: 10.1088/1748-9326/aafc1b.

12. *Delatolas N., MacDonald D. G., Goodman L. et al.* Comparison of structure and turbulent mixing between lateral and leading-edge river plume fronts: Microstructure observations from a T-REMUS AUV // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2023. V. 283. Article 108234. DOI: 10.1016/j.ecss.2023.108234.
13. *Eilola K., Meier H. E. M., Almroth E.* On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study // *J. Marine Systems*. 2009. V. 75. No. 1–2. P. 163–184. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.08.009.
14. *Frey D. I., Osadchiv A. A.* Large river plumes detection by satellite altimetry: case study of the Ob – Yenisei plume // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Article 5014. DOI: 10.3390/rs13245014.
15. *Glukhovets D., Sheberstov S., Vazyulya S. et al.* Influence of the Accuracy of Chlorophyll-Retrieval Algorithms on the Estimation of Solar Radiation Absorbed in the Barents Sea // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 19. Article 4995. DOI: 10.3390/rs14194995.
16. *Ivshin V. A., Trofimov A. G., Titov O. V.* Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting // *ICES J. Marine Science*. 2019. V. 76. P. i3-i9. DOI: 10.1093/icesjms/fsz159.
17. *Kolodziejczyk N., Hamon M., Boutin J. et al.* Objective analysis of SMOS and SMAP sea surface salinity to reduce large-scale and time-dependent biases from low to high latitudes // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2021. V. 38. No. 3. P. 405–421. DOI: 10.1175/JTECH-D-20-0093.1.
18. *Meissner T., Wentz F. J., Le Vine D. M.* The salinity retrieval algorithms for the NASA Aquarius version 5 and SMAP version 3 releases // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. P. 1–25. DOI: 10.3390/rs10071121.
19. *Osadchiv A. A., Medvedev I. P., Shchuka S. A. et al.* Influence of estuarine tidal mixing on structure and spatial scales of large river plumes // *Ocean Science*. 2020. V. 16. Iss. 4. P. 781–798. DOI: 10.5194/os-16-781-2020.
20. *Osadchiv A. A., Frey D. I., Shchuka S. A. et al.* Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2021. V. 126. Article e2020JC016486. DOI: 10.1029/2020JC016486.
21. *Osadchiv A., Zabudkina Z., Rogozhin V. et al.* Structure of the Ob – Yenisei plume in the Kara Sea shortly before autumn ice formation // *Frontiers in Marine Science*. 2023. V. 10. Article 1129331. DOI: 10.3389/fmars.2023.1129331.
22. *Pavlov V. K., Pfirman S. L.* Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 1995. V. 42. Iss. 6. P. 1369–1390. DOI: 10.1016/0967-0645(95)00046-1.
23. *Serreze M. C., Stroeve J.* Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // *Philosophical Trans. Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. V. 373. No. 2045. Article 20140159. DOI: 10.1098/rsta.2014.0159.
24. *Supply A., Boutin J., Vergely J.-L. et al.* New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 249. Article 112027. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112027.

Accuracy of NASA/SMAP satellite salinity in the area of the outer boundary of the Ob – Yenisei plume (river plume frontal zone) in the Kara Sea

A. A. Konik^{1,2}, A. V. Zimin^{1,2}, O. A. Atadzhanova^{1,3}, A. A. Osadchiv¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: konikrshu@gmail.com*

² *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia*

³ *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*

Satellite measurements of salinity of the sea surface layer are one of important sources of information about hydrophysical processes in the Arctic during the ice-free period. A number of previous studies have shown that standard algorithms for restoring salinity, developed and verified for the most typical thermohaline conditions for the World Ocean, work with low accuracy in the case of small values of temperature and salinity. Such conditions, in particular, are characteristic of the plumes of Arctic rivers which occupy significant areas during the ice-free season in the Arctic Ocean. In this work, satellite data were compared with full-scale salinity measurements carried out in the Ob – Yenisei plume

distribution zone in the Kara Sea in August and October 2021. It was established that standard satellite salinity algorithms describe the surface salinity fields with sufficiently high accuracy at salinity values above 18 PSU and temperatures above 7 °C. It is shown that using cluster analysis based on satellite measurements of salinity, it is possible to obtain reliable physical and geographical characteristics of the river plume frontal zone in the Kara Sea.

Keywords: satellite salinity, NASA/SMAP, *in situ* measurements, Ob – Yenisei plume, plume boundary, river plume frontal zone, Kara Sea, Arctic Ocean

Accepted: 04.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-9-19

References

1. Atadzhanova A. O., Zimin A. V., Svergun E. I., Konik A. A., Submesoscale Eddy Structures and Frontal Dynamics in the Barents Sea, *Physical Oceanography*, 2018, Vol. 25, No. 3, pp. 220–228, DOI: 10.22449/1573-160X-2018-3-220-228.
2. Ashik I. M., *Morya rossiiskoi Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh* (Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions), Saint Petersburg: AARI, 2021, 360 p. (in Russian).
3. Glukhovets D. I., Goldin Yu. A., A study of the bio-optical properties of the Kara sea using satellite data and shipboard measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 346–350 (in Russian).
4. Zatspein A. G., Zavialov P. O., Kremenetskiy V. V., Poyarkov S. G., Soloviev D. M., The Upper Desalinated Layer in the Kara Sea, *Oceanology*, 2010, Vol. 50, No. 5, pp. 698–708 (in Russian).
5. Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Konik A. A., Gordeeva S. M., Comparison of Hydrography Observations with Data of Global Products in the Barents Sea, *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2020, Vol. 13, No. 4, pp. 66–77 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667320040061.
6. Konik A. A., Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Pedchenko A. P., Assessment of the variability of the river plums frontal zone in the Kara sea on the basis of integration of satellite remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 241–250 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250.
7. Konik A. A., Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Spatial and Temporal Variability of the Characteristics of the River Plume Frontal Zone in the Kara Sea in the First Two Decades of the XXI Century, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2022, Vol. 15, No. 4, pp. 23–41 (in Russian), DOI: 10.48612/fpg/38mu-zda7-dpep.
8. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Sheberstov S. V., Development and use of regional algorithms for calculating the bio-optical characteristics of the seas of Russia according to satellite color scanners, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 99–105 (in Russian).
9. Pelevin V. V., Zavjalov P. O., Belyaev N. A. et al., Spatial variability of chlorophyll-*a*, dissolved organic matter and suspended matter in the surface layer of the Kara Sea in September 2011 as derived from lidar data, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 183–193, DOI: 10.7868/S0030157417010130.
10. Fedorov K. N., *Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov* (Physical nature and structure of oceanic fronts), Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983, 296 p. (in Russian).
11. Box J. E., Colgan W. T., Christensen T. R. et al., Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017, *Environmental Research Letters*, 2019, Vol. 14, Article 045010, DOI: 10.1088/1748-9326/aafc1b.
12. Delatolas N., MacDonald D. G., Goodman L. et al., Comparison of structure and turbulent mixing between lateral and leading-edge river plume fronts: Microstructure observations from a T-REMUS AUV, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2023, Vol. 283, Article 108234, DOI: 10.1016/j.ecss.2023.108234.
13. Eilola K., Meier H. E. M., Almroth E., On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study, *J. Marine Systems*, 2009, Vol. 75, No. 1–2, pp. 163–184, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.08.009.
14. Frey D. I., Osadchiv A. A., Large river plumes detection by satellite altimetry: case study of the Ob – Yenisei plume, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Article 5014, DOI: 10.3390/rs13245014.
15. Glukhovets D., Sheberstov S., Vazyulya S. et al., Influence of the Accuracy of Chlorophyll-Retrieval Algorithms on the Estimation of Solar Radiation Absorbed in the Barents Sea, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 19, Article 4995, DOI: 10.3390/rs14194995.
16. Ivshin V. A., Trofimov A. G., Titov O. V., Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting, *ICES J. Marine Science*, 2019, Vol. 76, pp. i3–i9, DOI: 10.1093/icesjms/fsz159.
17. Kolodziejczyk N., Hamon M., Boutin J. et al., Objective analysis of SMOS and SMAP sea surface salinity to reduce large-scale and time-dependent biases from low to high latitudes, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2021, Vol. 38, No. 3, pp. 405–421, DOI: 10.1175/JTECH-D-20-0093.1.

18. Meissner T., Wentz F. J., Le Vine D. M., The salinity retrieval algorithms for the NASA Aquarius version 5 and SMAP version 3 releases, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, pp. 1–25, DOI: 10.3390/rs10071121.
19. Osadchiev A. A., Medvedev I. P., Shchuka S. A. et al., Influence of estuarine tidal mixing on structure and spatial scales of large river plumes, *Ocean Science*, 2020, Vol. 16, pp. 781–798, DOI: 10.5194/os-16-781-2020.
20. Osadchiev A. A., Frey D. I., Shchuka S. A. et al., Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2021, Vol. 126, Article e2020JC016486, DOI: 10.1029/2020JC016486.
21. Osadchiev A., Zabudkina Z., Rogozhin V. et al., Structure of the Ob – Yenisei plume in the Kara Sea shortly before autumn ice formation, *Frontiers in Marine Science*, 2023, Vol. 10, Article 1129331, DOI: 10.3389/fmars.2023.1129331.
22. Pavlov V. K., Pfirman S. L., Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution, *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1995, Vol. 42, Issue 6, pp. 1369–1390, DOI: 10.1016/0967-0645(95)00046-1.
23. Serreze M. C., Stroeve J., Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting, *Philosophical Trans. Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, Vol. 373, No. 2045, Article 20140159, DOI: 10.1098/rsta.2014.0159.
24. Supply A., Boutin J., Vergely J.-L. et al., New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 249, Article 112027, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112027.