Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования

А. А. Коник^{1,2}, А. В. Зимин^{1,2}, О. А. Атаджанова¹, А. П. Педченко³

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117218, Россия E-mail: konikrshu@gmail.com

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

³ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, 107140, Россия

В работе на основе анализа валидированных спутниковых данных по температуре, солёности и уровню моря описана синоптическая изменчивость характеристик в области Стоковой фронтальной зоны Карского моря в августе – сентябре 2019 г. Валидация проводилась сопоставлением измерений радиометров спутников Suomi NPP VIIRS и NASA SMAP с данными *in situ* с борта НИС «Профессор Леванидов» с 15 по 27 сентября 2019 г. Результаты валидации показали высокую точность воспроизведения спутниковыми системами поверхностных полей температуры и солёности Карского моря. Положение и характеристики поверхностных полей температуры и солёности Карского моря. Положение и характеристики поверхностного опреснённого слоя, на внешней границе которого детектируется Стоковая фронтальная зона, выделялись с помощью кластерного анализа. Установлено, что градиенты в области фронтальной зоны в рассматриваемый период колебались от 0,05 до 0,1 °С/км, солёности — от 0,08 до 0,13 % /км. Показана изменчивость площади и градиентов Стоковой фронтальной зоны в тёплый период года.

Ключевые слова: Стоковая фронтальная зона, Карское море, поверхностный опреснённый слой, кластерный анализ, судовые измерения, спутниковые наблюдения

Одобрена к печати: 09.03.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250

Введение

Важным фактором формирования вод Карского моря является речной сток, суммарный объём которого равен 1350 км³/год (Pavlov, Pfirman, 1995). Более 80 % из всего объёма стока составляют воды Обской губы и Енисея (Михайлов, 1997), которые формируют большой по площади поверхностный опреснённый слой (ПОС). Толщина ПОС вблизи речных эстуариев может достигать порядка 10 м (Зацепин и др., 2010), а взвешенные и растворённые вещества в районе смешения речных и морских вод меняют биологическую и химическую структуру в устьевых районах Карского моря (Буренков и др., 2010). Значительный объём речного стока, имеющий собственный запас тепла и импульса, оказывает определяющее влияние на все системы Карского моря (Зацепин и др., 2015; Harms, Karcher, 2005).

В последние годы проведено множество исследований внешней границы ПОС, в которых используются в первую очередь данные судовых измерений солёности, а также привлекаются спутниковые и модельные данные хлорофилла *a* и температуры (Harms, Karcher, 1999; Kubryakov et al., 2016; Osadchiev et al., 2020). В результате скачка характеристик на границе опреснённой линзы Обь-Енисейских вод согласно классификации, представленной в работе (Федоров, 1983), формируется Стоковая фронтальная зона (СФЗ), которая чаще всего выделяется в поле солёности (Завьялов и др., 2015). В работах (Добровольский, Залогин, 1982; Русанов, Васильев, 1976) показано, что существует три главных типа распространения ПОС: «западный», «центральный» и «восточный», которые отражают основные положения СФЗ. Однако значительная синоптическая и внутрисезонная изменчивость границ Стоковой фронтальной зоны и отсутствие количественных оценок градиента внутри фронтальной зоны обуславливают актуальность её регулярного изучения в условиях современного меняющегося климата. Кроме того, в течение последних десятилетий прослеживается уменьшение площади ледового покрова (Serreze, Meier, 2018), что открывает новые возможности для исследования морей Арктического региона.

Отдельная проблема — выбор методического инструмента для изучения фронтальных зон в высокоширотном регионе (Постнов и др., 2006; Oziel et al., 2016). Согласно работе (Федоров, 1983), фронтальная зона определяется значительным превышением горизонтального градиента характеристик по сравнению с их фоновым распределением. Для западных морей Арктики оптимальным критерием фронтальных зон является его отличие от климатического (среднемноголетнего) не менее чем в два раза (Коник и др., 2019; Ожигин и др., 2016; Чвилев, 1991). Однако изменчивость градиентов характеристик по пространству не является постоянной величиной и проявляется в виде локальных максимумов, что не позволяет точно определить основные характеристики фронтальной зоны и проследить динамику её изменчивости (Manucharyan et al., 2014; Oziel et al., 2016).

Одним из важных факторов определения положения СФЗ является наличие измерений полей солёности, так как именно характеристики солёности отличают её от других вод. Использование только спутниковых данных солёности поверхности моря не позволительно в связи с большой погрешностью измерений в холодных солоноватых водах (Supply et al., 2020). Соответственно, для увеличения точности оценок СФЗ необходимо привлекать дополнительные характеристики поверхности вод, например температуры, уровня моря, хлорофилла *а*. Однако спутниковые наблюдения требуют валидации данными контактных измерений по всей акватории моря, что ранее для Карского моря не предпринималось. Отсутствие единого методического подхода (Аитаджанова, Зимин, 2019; Osadchiev et al., 2020) к изучению поверхностного проявления СФЗ значительно усложняет их исследование. Решением описанных сложностей является кластерный анализ (Гордеева, Малинин, 2006) на основе комплекса валидированных данных спутникового дистанционного зондирования.

Таким образом, цель настоящей работы — выполнить валидацию разнородных спутниковых данных для акватории Карского моря и описать особенности изменчивости характеристик вод в области Стоковой фронтальной зоны в тёплый период 2019 г.

Материалы и методы

В настоящей работе для детектирования характеристик СФЗ использовались среднемесячные и синоптические (осреднённые за 8 дней) спутниковые данные температуры и солёности поверхности моря, а также уровня моря с августа по сентябрь 2019 г.

Для идентификации термической фронтальной зоны использовались данные температуры поверхности Карского моря (ТПМ) уровня обработки L3 (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov), полученные с помощью спутникового радиометра Suomi NPP (*англ*. Suomi National Polarorbiting Partnership) VIIRS (*англ*. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) с пространственным разрешением $0,05^{\circ}$ по широте и долготе (Liu, Minnett, 2016).

В качестве данных, описывающих изменчивость солёности поверхности моря (СПМ), были взяты данные уровня обработки L3 (https://podaac.jpl.nasa.gov) спутника NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США) SMAP (*англ.* Soil Moisture Active Passive) с пространственным разрешением 0,25° по широте и долготе.

Для анализа динамического фронта были взяты суточные данные абсолютной динамической топографии (АДТ) Карского моря из базы AVISO (https://resources.marine.copernicus.eu) с пространственным разрешением 0,25° по широте и долготе. Объединённый массив включает в себя скорректированные альтиметрические данные со спутников Cryosat-2, Jason-1, Jason-2, Envisat (*англ*. Environmental Satellite), TOPEX/Poseidon (*англ*. Topography Experiment/ Poseidon), GFO-1 (*англ*. GEOdetic SATellite Follow-On), ERS-1 (*англ*. European Remote-Sensing Satellite) и ERS-2. Качество используемых спутниковых данных зависит как от вида зондирующих систем, так и от состояния поверхностных вод исследуемой акватории. Так, ошибка данных температуры морской поверхности Suomi NPP VIIRS в центральных частях Мирового океана составляет 0,15 °C (Minnett et al., 2020) и далее увеличивается от центра к северным и южным районам. Точность измерений поверхностной солёности зависит от температуры поверхностных вод (Meissner et al., 2018): при температуре от 10 до 20 °C яркостная температура практически не чувствительна к величине ТПМ. Однако в центральной части Карского моря ТПМ редко поднимается выше 10 °C, что значительно ухудшает качество данных СПМ. Величина ошибки спутниковых данных AVISO по уровню моря (*англ*. Sea Surface Height — SSH)) составляет 1-2 см на расстоянии, превышающем 20–40 км от берега (Ablain et al., 2015).

После получения данных был проведён расчёт градиентов всех трёх характеристик. Далее данные ТПМ, СПМ, АДТ и их градиенты были объединены в общие матрицы и приведены к единой пространственной сетке с помощью метода линейной интерполяции с минимальным шагом 0,25° по широте и долготе.

Для определения достоверности спутниковых данных по температуре и солёности проводилось их сопоставление с экспедиционными данными для горизонта 0 м. Использовались результаты *in situ* измерений на 47 гидрологических станциях (*puc. 1*) в юго-западной части Карского моря, проводимых научно-исследовательским судном «Профессор Леванидов» с 15 по 27 сентября 2019 г.



Рис. 1. Распределение полей температуры (*a*) и солёности (б) по осреднённым спутниковым данным, а также значения соответствующих характеристик на гидрологических станциях на поверхности (показано точкам с подписями)

Валидация спутниковых и *in situ* данных выполнялась следующим образом. Спутниковые данные усреднялись за 13 дней измерений, затем для каждой гидрологической станции подбирались наиболее близкие по расположению значения. Выполнялось сравнение данных по средним значениям (по критерию Стьюдента), по пространственной дисперсии (по критерию Фишера), оценивалась средняя аномалия (разница между спутниковыми и *in situ* данными) и функции расхождения, а также коэффициент корреляции по пространству. Подробно методика изложена в работе (Зимин и др., 2020).

Для идентификации СФЗ на поверхности Карского моря выполнялся кластерный анализ (Вайновский, Малинин, 1992; Гордеева, Малинин, 2006) полученных объединённых матриц спутниковых данных. Для определения необходимого количества классов выполнялось построение дендрограмм методом Уорда и методом *k*-средних. Оптимальная кластеризация проверялась критерием минимизации отношения внутриклассового и межклассового расстояний.

Для полученных классов на месячном и синоптическом (8-дневном) интервалах изменчивости определялись средние значения ТПМ, СПМ, АДТ и их градиентов, а также занимаемая площадь. Для класса, соответствующего СФЗ, расчёты выполнялись для синоптического масштаба осреднения.

Результаты работы

Валидация спутниковых данных. На *рис.* 1 представлено распределение полей температуры и солёности по осреднённым спутниковым данным, а также значения соответствующих характеристик на гидрологических станциях на глубине 0 м.

Температура в пределах исследуемого района по осреднённым спутниковым данным менялась от 1 до 7 °С, в то время как на станциях на поверхности — от 1,87 до 5,71 °С (см. *рис. 1a*). В целом тенденция уменьшения температуры с юго-запада района на северовосток отражалась в обоих типах данных. Средние значения и дисперсии схожи, что подтверждается критериями Стьюдента и Фишера (*табл. 1*), которые оказались меньше своих критических значений. Небольшая аномалия — 0,4 °С, которая составила всего 10 % от общего диапазона изменчивости, — также подтверждает совпадение данных. Учитывая высокую корреляцию (>0,9) и минимальное значение функции расхождения (близка к нулю), можно сделать вывод, что осреднённые спутниковые данные Suomi NPP VIIRS достоверно отражают поля температуры в исследуемые период.

Параметр	Температура	Солёность
Среднее in situ/спутник	4,2/4,1 °C	27,16/27,69 ‰
Дисперсия in situ/спутник	1,6/1,2 °C ²	21,60/17,32 ‰ ²
Аномалия между полями	0,43 °C	1,32 ‰
Функция расхождения	0,09	0,11
Критерий Фишера	1,3	1,25
Критерий Стьюдента	0,4	0,57
Коэффициент корреляции	0,91	0,92

Таблица 1. Статистические параметры для сравнительного анализа экспедиционных и спутниковых данных ($F_{\rm kp} = 1,48, t_{\rm kp} = 2$ при уровне значимости 0,05)

Пространственное распределение солёности (см. *рис. 16*) как по спутниковым данным, так и по *in situ* данным хорошо визуализирует положение области, связанной с ПОС. Общий разброс значений по спутниковым данным составляет от 15 до 35 % и на станциях по *in situ* данным — 15,9–32,4 %. При этом (см. *табл. 1*), несмотря на среднюю аномалию между полями в 1,32 %, функция расхождения близка к нулю (0,11), а коэффициент корреляции очень высокий (>0,9). Критерий Фишера и критерий Стьюдента меньше своих критических значений, что свидетельствует о незначимых различиях по дисперсии и среднему. Таким образом, спутниковые данные NASA SMAP с высокой достоверностью описывают поле солёности на поверхности.

Опираясь на результаты валидации, можно уверено утверждать, что представленные спутниковые данные точно воспроизводят поверхностные поля температуры и солёности Карского моря, что позволяет их использовать для анализа характеристик фронтальных зон.

Выделение Стоковой фронтальной зоны (СФЗ). На рис. 2a, б представлены результаты кластерного анализа по среднемесячным данным матриц рассматриваемых характеристик за август 2019 г. Оптимальным является разделение на три класса.



Рис. 2. Результаты кластерного анализа среднемесячных данных ТПМ, СПМ, АДТ и их градиентов в августе 2019 г.: *а* — дендрограмма для определения оптимального количества классов, полученная методом Уорда; *б* — классификация, полученная методом *k*-средних: класс 1 — карская водная масса, класс 2 — баренцевоморская водная масса, класс 3а — внешняя граница ПОС – СФЗ, класс 3б — внутренняя часть ПОС

При сравнении полученных оценок с работами (Добровольский, Залогин, 1982; Pavlov et al., 1996) видно, что 1-й класс соответствует карской водной массе, 2-й класс схож с характеристиками баренцевоморских вод, а 3-й класс соотносится с параметрами ПОС. Отметим, что область, отнесённая к баренцевоморским водам возле о. Новая Земля в западной части Карского моря, по результатам разделения данных на 3 класса при более подробной классификации относится к самостоятельному подклассу (см. *рис. 2a*). Согласно исследованию (Дубинина и др., 2019), эта зона является областью новоземельского речного стока. Аналогично и различия свойств внутри ПОС (Osadchiev et al., 2020) позволили разделить 3-й класс на два подкласса: класс 3а, относящийся к её внешней границе ПОС – СФЗ, и класс 36, который соответствует внутренней части линзы Обь-Енисейских вод.

В *табл. 2* отражены среднемесячные оценки характеристик ТПМ, СПМ, АДТ и их градиентов за август и сентябрь 2019 г. внутри выделенных классов.

Характеристика класса	Август			Сентябрь				
	класс 1	класс 2	класс За	класс 3б	класс 1	класс 2	класс За	класс 3б
<i>T</i> ¯, °C	6,12	4,66	6,52	8,59	5,47	3,36	3,72	5,65
$\Delta \overline{T}$, °C/km	0,05	0,04	0,06	0,04	0,09	0,03	0,11	0,16
\overline{H} , см	-8,79	-20,95	-1,35	6,40	-3,64	-17,73	3,31	10,87
$\Delta \overline{H}$, см/0,25° сетки	1,01	0,82	1,81	1,64	0,95	1,06	1,48	1,42
\overline{S} , ‰	29,82	32,83	23,92	13,48	30,05	33,46	26,63	19,84
$\Delta \overline{S}, \%_{o/\text{KM}}$	0,06	0,06	0,10	0,09	0,06	0,04	0,09	0,08
Площадь, тыс. км ²	321	165	198	190	278	127	236	221

Таблица 2. Внутриклассовые среднемесячные оценки количественных характеристик ТПМ, СПМ, АДТ и их градиентов в августе и сентябре 2019 г.

Из *табл. 2* видно, что максимальные градиенты температуры поверхности СФЗ наблюдаются в сентябре, в то время как максимальные градиенты уровня моря превалируют в августе

2019 г. Стоит отметить, что колебания среднемесячных градиентов солёности СФЗ минимальны по сравнению с другими характеристиками.

Как видно из *рис. 2a, б*, внешняя граница СФЗ берёт начало в южной части моря около п-ова Ямал. Далее СФЗ идёт на север и недалеко от о. Новая Земля поворачивает на северо-восток. Указанный отрезок СФЗ характеризуется устойчивым положением в оба месяца, что связано с интенсивными соленосными и температурными градиентами в этом районе, которые отмечались по данным судовых и спутниковых измерений (Завьялов и др., 2015). Внешняя граница линзы вытянута в восточном направлении, что, по-видимому, связано с ветровой динамикой. Анализ положения ПОС показывает наличие сходства с центральным типом (Русанов, Васильев, 1976), который является нетипичным для Карского моря (Kubryakov et al., 2016).

Оценки синоптической изменчивости характеристик СФЗ представлены в *табл. 3.* СФЗ чётко выделяется по результатам кластерного анализа на всех рассматриваемых временных интервалах. *Таблицы 2 и 3* показывают наличие сходства среднемесячных и синоптических характеристик. На синоптическом интервале изменчивости СФЗ чётко прослеживается по данным градиентов солёности, температуры и уровня моря. В то же время стоит отметить резкие уменьшения градиента температуры в последние декады августа и сентября (см. *табл. 3*). Это подтверждает тезис, что градиенты солёности (Зацепин и др., 2015) и уровня являются ключевыми параметрами, характеризующими СФЗ. При уменьшении площади СФЗ отмечаются минимальные синоптические градиенты солёности и уровня. Данная зависимость, по-видимому, связана с вариациями летнего половодья и начала осенней-зимней межени рек Оби и Енисея (Кузин, Лаптева, 2014; Магрицкий и др., 2019).

Дата	1—8 ав- густа	9—16 ав- густа	17—24 ав- густа	25 авгу- ста –1 сентября	2—8 сен- тября	9—16 сен- тября	17—24 сен- тября
$\Delta \overline{T}$, °C/km	0,09	0,08	0,10	0,06	0,09	0,09	0,05
$\Delta \overline{H}, \ \mathrm{cm}/0,25^{\circ} \ \mathrm{сетки}$	1,91	1,96	2,20	1,81	1,50	2,28	1,86
$\Delta \overline{S}, \% / KM$	0,13	0,10	0,10	0,11	0,08	0,10	0,09
Площадь, тыс. км ²	215	179	189	184	146	195	94

Таблица 3. Синоптические оценки количественных характеристик СФЗ в августе и сентябре 2019 г., осреднённые за 8 сут

Динамика пространственной изменчивости синоптической СФЗ в целом схожа со среднемесячной. В начале августа СФЗ занимает значительные площади Карского моря, что подтверждают работы (Зацепин и др., 2015; Osadchiev et al., 2020). В сентябре площадь СФЗ и градиенты уменьшаются, что, вероятно, связано с усилением атмосферных процессов над Карским морем, которые влияют на качество спутниковых измерений и, как следствие, на кластеризацию.

Заключение

В ходе настоящей работы для акватории Карского моря выполнена комплексная валидация спутниковых данных по температуре и солёности. Показаны особенности пространственной изменчивости Стоковой фронтальной зоны и её внешней границы по объединённым спутниковым данным, включающим в себя температуру, солёность поверхности и уровень моря в августе и сентябре 2019 г.

Результаты количественного сопоставления контактных и дистанционных данных показали, что при описании изменчивости гидрологических условий на акватории Карского моря можно надёжно опираться на данные Suomi NPP VIIRS и NASA SMAP. Применение кластерного анализа к верифицированным спутниковым данным позволило выделить на акватории моря доминирующие классы вод: карские, баренцевоморские и поверхностный опреснённый слой. По результатам кластеризации произведена оценка изменчивости гидрологических характеристик всех типов вод и их площади. Показано, что один из подклассов связан со Стоковой фронтальной зоной (СФЗ). Произведена оценка среднемесячных и синоптических характеристик СФЗ. Установлено, что СФЗ занимала стабильное положение в центральной части Карского моря в 2019 г. При уменьшении площади СФЗ градиенты солёности и уровня уменьшаются, что связано с гидрологическим режимом стока рек Оби и Енисея.

Таким образом, использование современных разнородных спутниковых данных для выделения фронтальных зон с применением к ним кластерного анализа в высокоширотных морях российской Арктики даёт широкие возможности для оценки их синоптической и внутрисезонной изменчивости.

Обработка и анализ спутниковых данных выполнены в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-35-90053. Обработка данных судовых измерений выполнена в рамках государственного задания по теме № 0128-2021-0014.

Литература

- 1. *Атаджанова О.А., Зимин А.В.* Анализ характеристик проявлений субмезомасштабных вихрей Баренцева, Карского и Белого морей по данным спутниковых наблюдений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 3. С. 36–45.
- 2. *Буренков В. И., Гольдин Ю. А., Артемьев В. А., Шебестов С. В.* Оптические характеристики вод Карского моря по судовым и спутниковым наблюдениям // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 716–729.
- 3. *Вайновский П.А., Малинин В. Н.* II. Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ: учеб. пособие. СПб.: РГГМИ, 1992. 96 с.
- 4. *Гордеева С. М., Малинин В. Н.* Крупномасштабная изменчивость южного субтропического фронта в юго-восточной части Тихого океана // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2006. № 2. С. 160–169.
- 5. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: МГУ, 1982. 192 с.
- Дубинина Е. О., Коссова С. А., Мирошников А. Ю. Источники и механизмы опреснения морских вод в заливах Цивольки и Седова (Новая Земля) по изотопным (δd, δ¹⁸0) данным // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 928–938.
- 7. Завьялов П.О., Ижницкий А.С., Осадчиев А.А., Пелевин В.В., Грабовский А.Б. Структура термохалинных и биооптических полей на поверхности Карского моря осенью 2011 года // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 514–525.
- 8. Зацепин А. Г., Морозов Е. Г., Пака В. Т., Демидов А. Н., Кондрашов А. А., Корж А. О., Кременецкий В. В., Поярков С. Г., Соловьев Д. М. Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 года // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 683–697.
- 9. 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. Т. 55. № 4. С. 502–513.
- 10. 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 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 4. С. 66–77.
- 11. Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А. Количественные оценки изменчивости характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Карского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 1. С. 54–61.
- 12. *Кузин В. И., Лаптева Н.А.* Математическое моделирование стока основных рек Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 6. С. 525–529.
- 13. *Магрицкий Д. В., Чалов С. Р., Агафонова С.А., Кузнецов М.А., Банщикова Л. С.* Гидрологический режим нижней Оби в современных гидроклиматических условиях и под влиянием крупномасштабной водохозяйственной деятельности // Науч. вестн. Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 1. С. 106–119.
- 14. *Михайлов В. Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее, будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.

- 15. Ожигин В. К., Ившин В. К., Трофимов А. Г., Карсаков А. Л., Анциферов М. Ю. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО, 2016. 216 с.
- 16. Постнов А.А., Жохова Н.В., Лапшин В.Б., Орех А.Г. Характеристики водных масс фронтальной зоны северо-восточной части Атлантического океана // Метеорология и гидрология. 2006. № 7. С. 56–65.
- 17. Русанов В. П., Васильев А. Н. Распространение речных вод в Карском море по данным гидрохимических определений // Тр. Аркт. и антаркт. научно-исследоват. ин-та. 1976. Т. 323. С. 188–196.
- 18. *Федоров К. Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 296 с.
- 19. *Чвилев С. В.* Фронтальные зоны Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 1991. № 11. С. 103–108.
- Ablain M., Cazenave A., Larnicol G., Balmaseda M., Cipollini P., Faugère Y., Fernandes M.J., Henry O., Johannessen J.A., Knudsen P., Andersen O., Legeais J., Meyssignac B., Picot N., Roca M., Rudenko S., Scharffenberg M. G., Stammer D., Timms G., Benveniste J. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // Ocean Science. 2015. No. 11. P. 67–82.
- 21. *Harms I. H., Karcher M. J.* Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea // J. Geophysical Research: Oceans. 1999. V. 104. No. C6. P. 13431–13448.
- 22. *Harms I. H., Karcher M. J.* Kara Sea freshwater dispersion and export in the late 1990s // J. Geophysical Research. 2005. No. 110. Art. No. C08007. 9 p. DOI: 10.1029/2004JC002744.
- 23. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* River plume dynamics in the Kara Sea from altimetrybased Lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data // Remote Sensing of Environment. 2016. No. 176. P. 177–187.
- 24. *Liu Y.*, *Minnett P.J.* Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 177. P. 48–64.
- 25. *Manucharyan G. E., Timmermans M. L.* Generation and separation of mesoscale eddies from surface ocean fronts // J. Physical Oceanography. 2014. V. 43. No. 12. P. 2545–2562.
- 26. *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. No. 10. P. 1121.
- Minnett P.J., Kilpatrick K.A., Podestá G. P., Evans R. H., Szczodrak M. D., Izaguirre M.A., Williams E. G., Walsh S., Reynolds R. M., Bailey S. W., Armstrong E. M., Vazquez-Cuervo J. Skin Sea-Surface Temperature from VIIRS on Suomi-NPP–NASA Continuity Retrievals // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 20. Art. No. 3369. 37 p.
- Osadchiev A.A., Frey D.I., Shchuka S.A., Tilinina N.D., Morozov E.G., Zavialov P.O. Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods // J. Geophysical Research: Oceans. 2020. P. 1–35. DOI: 10.1029/2020JC016486.
- 29. *Oziel L., Sirven J., Gascard J. C.* The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // Ocean Science. 2016. V. 12. No. 1. P. 169–184.
- 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. No. 6. P. 1369–1390.
- 31. Pavlov V. K., Timohov L. A., Baskakov G. A., Kulakov M. Yu., Kurazhov V. K., Pavlov P. V., Pivovarov S. V., Stanovoy V. V. Hydrometeorological Regime of the Kara, Laptev, and East-Siberian Seas. University of Washington, Seattle, 1996. 185 p.
- 32. Serreze M. C., Meier W. N. The Arctic's sea ice cover: trends, variability, predictability, and comparisons to the Antarctic // Annals of the New York Academy of Sciences. 2018. P. 1–18.
- 33. Supply A., Boutin J., Vergely J.-L., Kolodziejczyk N., Reverdin G., Reul N., Tarasenko A. New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 249. Art. No. 112027.

Assessment of the variability of the River Plums frontal zone in the Kara Sea on the basis of integration of satellite remote sensing data

A. A. Konik^{1,2}, A. V. Zimin^{1,2}, O. A. Atadzhanova¹, A. P. Pedchenko³

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117218, Russia E-mail: konikrshu@gmail.com

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia ³ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography

Moscow 107140, Russia

Based on the analysis of validated satellite data on temperature, salinity, and sea level, the synoptic variability of the characteristics in the area of the River Plums frontal zone of the Kara Sea in August – September 2019 is described. The validation was carried out on the basis of comparing the measurements of the radiometers of the Suomi NPP VIIRS and NASA SMAP satellites with in-situ data from the R/V Professor Levanidov from September 15 to 27, 2019. The results of the validation showed high accuracy of satellite systems reproduction of the surface temperature and salinity fields of the Kara Sea. The position and characteristics of the surface desalinated layer, at the outer boundary of which the River Plums frontal zone is detected, were distinguished using cluster analysis. It was found that the gradients in the frontal zone during the period under review ranged from 0.05 to 0.1 °C/km, and the salinity from 0.08 to 0.13 %/km. The variability of the area and gradients of the River Plums frontal zone is shown.

Keywords: River Plums frontal zone, Kara Sea, surface desalinated layer, cluster analysis, R/V measurements, satellite observation

Accepted: 09.03.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250

References

- 1. Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data, *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 36–45 (in Russian).
- 2. Burenkov V. I., Goldin Yu. A., Artem'ev V. A., Shebestov S. V., Seawater Optical Characteristics of the Kara Sea Derived from Ship and Satellite Data, *Okeanologiya*, 2010, Vol. 50, No. 5, pp. 716–729 (in Russian).
- 3. Vainovskii P.A., Malinin V.N., *II. Metody obrabotki i analiza okeanologicheskoi informatsii. Mnogomernyi analiz: uchebnoe posobie* (II. Methods for processing and analyzing oceanological information. Multivariate analysis), Saint Petersburg: RGGMI Publ., 1992, 96 p. (in Russian).
- 4. Gordeeva S. M., Malinin V. N., Large-scale variability of the southern subtropical front in the south-eastern part Pacific Ocean, *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2006, No. 2, pp. 160–169 (in Russian).
- 5. Dobrovolskii A. D., Zalogin B. S., *Morya SSSR* (USSR seas), Moscow: MGU Publ., 1982, 192 p. (in Russian).
- Dubinina E. O., Kossova S. A., Miroshnikov A. Yu., Sources and mechanisms of seawater freshening in Tsivolky and Sedov bays (Novaya Zemlya Archipelago) based on isotope data (δd and δ¹⁸o), *Oceanology*, 2019, Vol. 59, No. 6, pp. 836–847.
- Zavialov P. O., Izhitskiy A. S., Osadchiev A. A., Pelevin V. V., Grabovskiy A. B., The structure of thermohaline and bio-optical fields in the surface layer of the Kara Sea in September 2011, *Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 4, pp. 461–471.
- Zatsepin A. G., Morozov E. G., Paka V. T., Demidov A. N., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Kremenetskiy V. V., Poyarkov S. G., Soloviev D. M., Circulation in the southwestern part of the Kara sea in September 2007, *Oceanology*, 2010, Vol. 50, No. 5, pp. 643–656.
- 9. Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V., Kubryakov A. A., Stanichnyi S. V., Soloviev D. M., Propagation and transformation of waters of the surface desalinated layer in the Kara sea, *Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 4, pp. 450–460.
- 10. 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, *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2020, Vol. 13, No. 4, pp. 66–77 (in Russian).

- 11. Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Quantitative estimations of the variability of characteristics of the temperature of the sea surface in the front of the frontal zone of the Kara sea, *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 54–61 (in Russian).
- 12. Kuzin V.I., Lapteva N.A., Mathematical simulation of runoff of main Siberian rivers, *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 6, pp. 525–529 (in Russian).
- 13. Magritskii D. V., Chalov S. R., Agafonova S. A., Kuznetsov M. A., Banshchikova L. S., Hydrological regime of the lower Ob in modern hydroclimatic conditions and under the influence of large-scale water management, *Nauchnyi vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga*, 2019, No. 1, pp. 106–119 (in Russian).
- 14. Mikhailov V. N., *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashchee, budushchee* (Estuaries of rivers of Russia and neighboring countries: past, present, future), Moscow: GEOS, 1997, 413 p. (in Russian).
- 15. Ozhigin V.K., Ivshin V.K., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Antsiferov M.Yu., *Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost*' (The Barents Sea Water: structure, circulation, variability), Murmansk: PINRO, 2016, 216 p. (in Russian).
- 16. Postnov A. A., Zhokhova N. V., Lapshin V. B., Orekh A. G., Characteristics of water masses of the frontal zone of the northeastern Atlantic Ocean, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2006, No. 7, pp. 56–65 (in Russian).
- 17. Rusanov V. P., Vasil'ev A. N., Distribution of river waters in the Kara Sea according to hydrochemical definitions, *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*, 1976, Vol. 323, pp. 188–196 (in Russian).
- 18. Fedorov K. N., *Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov* (The physical nature and structure of oceanic fronts), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 296 p. (in Russian).
- 19. Chvilev S.V., Frontal zones of the Barents Sea, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1991, No. 11, pp. 103–108 (in Russian).
- Ablain M., Cazenave A., Larnicol G., Balmaseda M., Cipollini P., Faugère Y., Fernandes M.J., Henry O., Johannessen J.A., Knudsen P., Andersen O., Legeais J., Meyssignac B., Picot N., Roca M., Rudenko S., Scharffenberg M.G., Stammer D., Timms G., Benveniste J., Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project, *Ocean Science*, 2015, No. 11, pp. 67–82.
- 21. Harms I. H., Karcher M. J., Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1999, Vol. 104, No. C6, pp. 13431–13448.
- 22. Harms I. H., Karcher M. J., Kara Sea freshwater dispersion and export in the late 1990s, *J. Geophysical Research*, 2005, No. 110, Art. No. C08007, 9 p., DOI: 10.1029/2004JC002744.
- 23. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G., River plume dynamics in the Kara Sea from altimetrybased Lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, No. 176, pp. 177–187.
- 24. Liu Y., Minnett P.J., Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 177, pp. 48–64.
- 25. Manucharyan G. E., Timmermans M. L., Generation and separation of mesoscale eddies from surface ocean fronts, *J. Physical Oceanography*, 2014, Vol. 43, No. 12, pp. 2545–2562.
- 26. 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, No. 10, p. 1121.
- Minnett P.J., Kilpatrick K.A., Podestá G.P., Evans R.H., Szczodrak M. D., Izaguirre M.A., Williams E. G., Walsh S., Reynolds R. M., Bailey S. W., Armstrong E. M., Vazquez-Cuervo J., Skin Sea-Surface Temperature from VIIRS on Suomi-NPP–NASA Continuity Retrievals, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 20, Art. No. 3369, 37 p.
- Osadchiev A.A., Frey D.I., Shchuka S.A., Tilinina N.D., Morozov E.G., Zavialov P.O., Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2020, pp. 1–35, DOI: 10.1029/2020JC016486.
- 29. Oziel L., Sirven J., Gascard J.C., The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011), *Ocean Science*, 2016, Vol. 12, No. 1, pp. 169–184.
- 30. 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, No. 6, pp. 1369–1390.
- 31. Pavlov V. K., Timohov L. A., Baskakov G. A., Kulakov M. Yu., Kurazhov V. K., Pavlov P. V., Pivovarov S. V., Stanovoy V. V., *Hydrometeorological Regime of the Kara*, *Laptev*, *and East-Siberian Seas*, University of Washington, Seattle, 1996, 185 p.
- 32. Serreze M. C., Meier W. N., The Arctic's sea ice cover: trends, variability, predictability, and comparisons to the Antarctic, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2018, pp. 1–18.
- 33. Supply A., Boutin J., Vergely J.-L., Kolodziejczyk N., Reverdin G., Reul N., Tarasenko A., New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean, *Remote Sensing of Environment*, 2020, No. 249, Art. No. 112027.