

УДК 551.465

СТРУКТУРА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛЮМА РЕКИ ЛЕНЫ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2021 г. Э. А. Спивак¹, А. А. Осадчиев², *, И. П. Семилетов¹¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.А. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: osadchiev@ocean.ru

Поступила в редакцию 28.10.2019 г.

После доработки 02.04.2020 г.

Принята к публикации 18.03.2021 г.

Данная работа посвящена исследованию структуры и сезонной изменчивости наиболее опресненной части плюма р. Лены в юго-восточной части моря Лаптевых, а именно, в акватории, прилегающей к восточной части дельты Лены, и в губе Буор-Хая. На основе натурных гидрологических данных показано, что в течение летнего периода происходит аккумуляция пресноводного стока р. Лены в губе Буор-Хая. В осенний период пониженная соленость в этом полуизолированном и мелководном заливе сохраняется значительно дольше, чем в области, непосредственно прилегающей к восточной части дельты р. Лены, что нетипично для плюмов крупных рек. Таким образом, губа Буор-Хая служит резервуаром пресноводного стока в течение длительного осенне-зимнего периода. Более того, этот залив служит вторичным источником опресненных и теплых вод в юго-восточной части моря Лаптевых, сравнимым по объему со стоком р. Лены в период осенне-зимней межени.

Ключевые слова: речной плюм, поверхностная соленость, сезонная изменчивость, море Лаптевых, река Лена, губа Буор-Хая

DOI: 10.31857/S0030157421060149

1. ВВЕДЕНИЕ

В Северный Ледовитый океан, занимающий всего 3% площади поверхности и 1% объема Мирового океана, поступает значительный материковый сток, составляющий более 11% суммарного мирового стока в океан [14, 20]. В результате этого в Северном Ледовитом океане формируется опресненный поверхностный слой и значительные вертикальные градиенты солености [9, 12]. В силу того, что морской лед в глубоководной части океана формируется только в случае существования постоянного галоклина, ограничивающего тепловую конвекцию [11], соленостная стратификация в Арктике играет ключевую роль в изменчивости ледяного покрова и регионального альбедо, влияющего на климатические процессы в глобальном масштабе [27]. Кроме того, соленостная стратификация ограничивает восходящий поток тепла от более теплых глубинных атлантических и тихоокеанских вод, что также влияет на образование ледяного покрова в Арктике [13, 36]. Пресноводный сток также оказывает существенное влияние на многие региональные процессы в Арктике, особенно в прибрежных и шельфовых районах, такие как циркуляция вод, перенос взвешенных и растворенных веществ, образование первичной продукции, распределе-

ние антропогенного загрязнения, асидификация, отложение терригенного материала в шельфовых районах Арктики [25–28, 30–33, 39–41, 43].

Лена – вторая по размеру река, впадающая в Северный Ледовитый океан, и 8-я река в мире по объему стока. Длина и площадь бассейна р. Лены составляют 5100 км и 2490000 км² соответственно. Среднегодовой сток Лены в море Лаптевых оценивается в 590 км³ [1, 21, 34]. Лена – крупнейшая река в мире, полностью протекающая в районе многолетней мерзлоты. В связи с этим, основное питание р. Лены составляют снеговые и дождевые воды, в то время как питанию грунтовыми водами препятствуют многолетнемерзлые породы [1]. Таким образом, внутригодовая изменчивость расхода в низовьях Лены характеризуется половодьем с июня по октябрь с пиковыми значениями в июне (40% годового стока) и несколькими довольно высокими дождевыми паводками осенью [34]. В течение межени с ноября по май низовья р. Лены замерзают, и в этот период в море поступает менее 15% годового стока [34]. Среднегодовое и максимальное зарегистрированные значения речного расхода составляют 17100 и 220000 м³/с соответственно [1, 18]. Высокая среднегодовая концентрация взвешенного вещества в воде Лены (40 г/м³) определяет боль-

шие значения объемов стока взвешенных ($(17-21) \times 10^6$ т в год) и влекомых (5×10^6 т в год) наносов [21].

При впадении в море Лаптевых р. Лена образует обширную дельту, входящую в число крупнейших речных дельт мира (рис. 1). Дельта Лены имеет сложную морфологию, состоит из сотен протоков, площадь и вдольбереговая протяженность дельты составляют 32000 км^2 и 500 км соответственно [1, 8, 18]. Крупнейшими протоками дельты р. Лены являются Трофимовская, Быковская и Сардахская протоки, расположенные в восточной части дельты, в них поступает 80–90% стока Лены [1, 18].

При впадении Лены в море формируется поверхностная опресненная водная масса, называемая плюмом р. Лены. Внешняя граница плюма Лены условно проводится по изохалине в 15 епс, где, как правило, расположен резкий градиент солёности между опресненным поверхностным слоем и нижележащими солёными водами. В летне-осенний период плюм р. Лены занимает площадь в сотни тысяч квадратных километров в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море [34]. В зимне-весенний период во время межени на р. Лене площадь плюма значительно сокращается до юго-восточной части моря Лаптевых. Вместе со стоком Лены в море Лаптевых выносятся большое количество терригенной взвеси, биогенных элементов и антропогенных загрязнений [4, 8, 18, 21]. Таким образом, распространение плюма Лены оказывает существенное воздействие на физические, химические и биологические процессы как непосредственно в придельтовой области и прилегающих участках шельфа [6, 7, 19], так и в масштабах всего моря Лаптевых [2, 15, 33, 38, 39] и азиатского сектора Северного Ледовитого океана [16, 17, 29, 41], чему были посвящены многочисленные исследования. Тем не менее, многие важные аспекты как внутренней структуры, так и динамики самого плюма р. Лены остаются недостаточно изученными. Данная работа посвящена исследованию сезонной изменчивости структуры наиболее опресненной части плюма р. Лены в юго-восточной части моря Лаптевых, а именно в акватории, прилегающей к восточной части дельты Лены (ее граница обозначена пунктирной линией на рис. 1), и в губе Буор-Хая (ее граница обозначена сплошной линией на рис. 1).

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа основана на натуральных данных, собранных в ходе 12 морских экспедиций на НИС “Дунай” в сентябре 1999 г., НИС “Николай Колумейцев” в августе–сентябре 2000 г., НИС “Иван Киреев” в августе–сентябре 2004 г., ПТС “Ауга” в сентябре 2005 г., НИС “Нептун” в сентябре 2006 г.,

в рамках российско-шведской экспедиции ISSS08 на НИС “Яков Смирницкий” в июле–августе 2008 г., ПТС “ТБ-0012” в августе 2008 г., ПТС “ТБ-0012” в августе–сентябре 2009 г., 57-го рейса НИС “Академик Лаврентьев” в сентябре–октябре 2011 г., НИС “Виктор Буйницкий” в сентябре 2012 г., 78-го рейса НИС “Академик Лаврентьев” в октябре 2016 г. и 73-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в октябре 2018 г. в акватории моря Лаптевых, расположенной к востоку от дельты Лены, и в губе Буор-Хая (рис. 1). Кроме этого, использованы данные, полученные в ходе 7 осенних санно-тракторных экспедиций в губе Буор-Хая в марте–апреле 2002 г., апреле 2007 г., апреле 2011 г., марте–апреле 2012 г., апреле 2013, апреле 2014 г., апреле–мае 2015 г.

Для измерения вертикального распределения температуры и солёности в 1999, 2000 и 2002 гг. использовался STD-зонд *Memory STD (ALEC Electronics)*. В морских экспедициях в 2004, 2005, 2006, 2007, 2012 гг., а также в весенних санно-тракторных экспедициях в 2007, 2011 и 2012 гг. использовался STD-зонд *SBE19 (Sea Bird Electronics)*. В морских экспедициях 2008 г. и в весенней санно-тракторной экспедиции 2013 г. использовался STD-зонд *YSI-6920 (Yellow Springs Instrument)*. В весенних санно-тракторных экспедициях в 2014 и 2015 гг. использовался STD-зонд *XR-620 (Rinko)*. В морских экспедициях 2011, 2016 и 2018 гг. использовался STD-зонд *SBE9 (Sea Bird Electronics)*. В дополнение к вышеизложенным измерениям в работе использовались вертикальные термохалинные измерения из базы данных World Ocean Database (WOD) [10], полученные в исследуемом регионе в январе (в 1977, 1982 и 1983 гг.), феврале (в 1977–1982 гг.) и июле (в 1955–1959, 1965–1969, 1977, 1981, 1983 гг.). В морских экспедициях в качестве поверхностной солёности принималась солёность на глубине 2 м, а в зимних санно-тракторных экспедициях – на глубине 0.5 м от подошвы льда, при этом толщина льда составляла 2–2.5 м. Также для анализа синоптической изменчивости поверхностной солёности в акватории, прилегающей к восточной части дельты Лены, в экспедиции 2018 г. использовались данные измерения температуры и солёности на глубине 2–3 м вдоль хода движения судна с помощью проточной системы, оборудованной термосалинографом *SBE21 (Sea Bird Electronics)* [3, 30].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Сезонная изменчивость. На основе натуральных данных, полученных в ходе 19 экспедиций, были построены среднемесячные карты поверхностного распределения солёности в исследуемом регионе в марте, апреле, августе, сентябре и октябре. Количественное распределение гидрологических данных по этим месяцам неравномер-

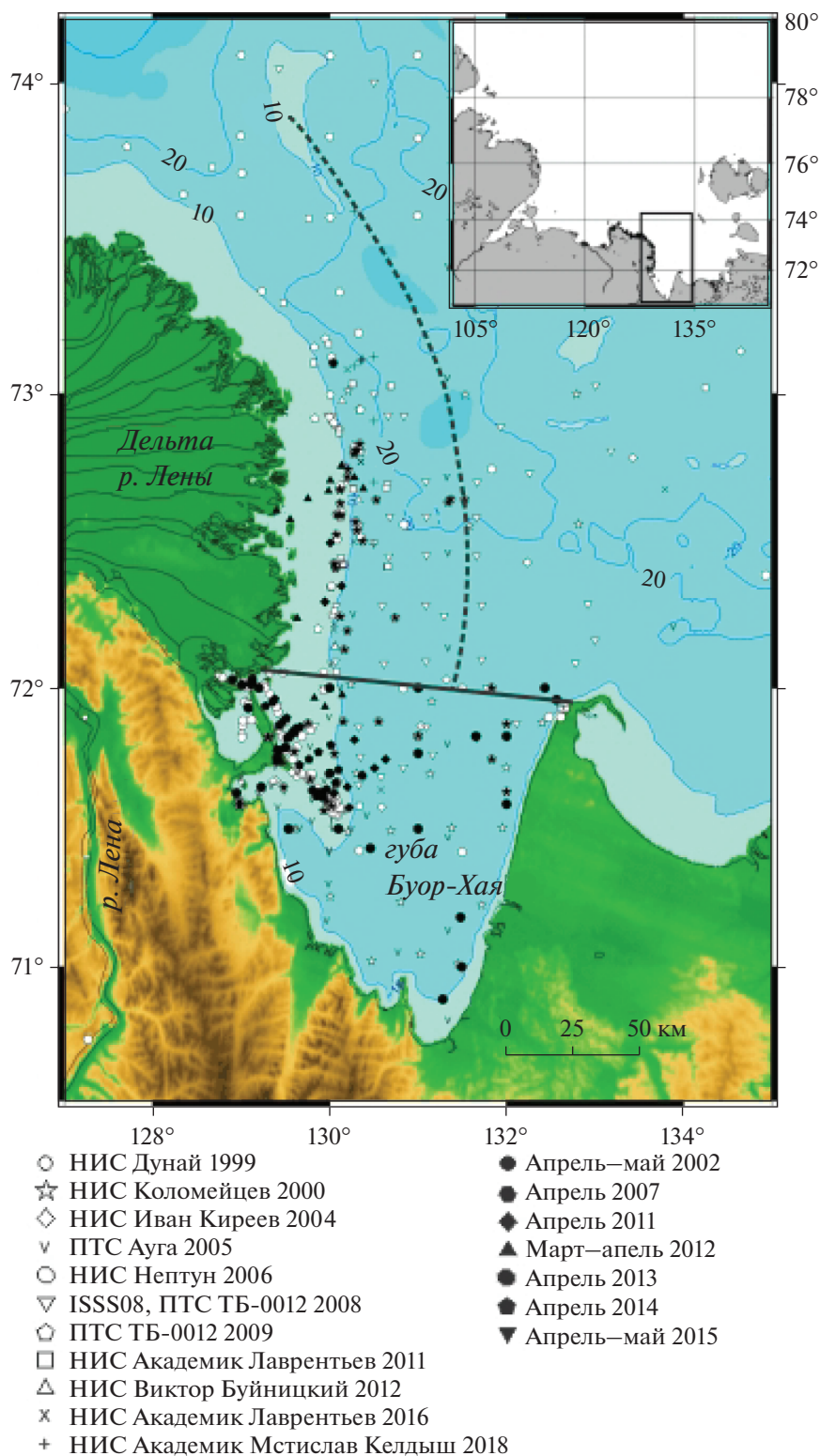


Рис. 1. Расположение района исследований в юго-восточной части моря Лаптевых (в верхнем правом углу). На врезке показаны донная топография района исследований и схема расположения гидрологических станций 18 экспедиций в 1999–2018 гг. Прерывистой линией обозначена граница приустьевой области. Сплошной линией обозначена губа Буор-Хая.

Таблица 1. Распределение станций по месяцам и годам экспедиционных измерений

| | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь |
|------|------|--------|-----|------|------|--------|----------|---------|
| 1999 | | | | | | | 20 | |
| 2000 | | | | | | 14 | 25 | |
| 2002 | | 20 | 5 | | | | | |
| 2004 | | | | | | 23 | 3 | |
| 2005 | | | | | | | 53 | |
| 2006 | | | | | | | 67 | |
| 2007 | | 53 | | | | | 2 | |
| 2008 | | | | | | 57 | | |
| 2009 | | | | | | 21 | 21 | |
| 2011 | | 15 | | | | | 27 | |
| 2012 | 8 | 5 | | | | | 9 | |
| 2013 | | 15 | | | | | | |
| 2014 | | 30 | | | | | | |
| 2015 | 5 | 27 | | | | | | |
| 2016 | | | | | | | 9 | 7 |
| 2017 | | | | | | | | |
| 2018 | | | | | | | | 11 |

ное. Большая часть имеющихся данных получены в ходе 12 морских экспедиций в период открытой воды, а именно в августе–октябре. Гидрологические измерения в этот период охватывают весь район исследований. Большая часть измерений, полученных в ходе 7 весенних санно-тракторных экспедиций (март и апрель), напротив, охватывала лишь район вблизи придельтовой области и только в 2002 г. была исследована большая часть губы Буор-Хая. Таким образом, наиболее изученными являются летне-осенние месяцы, менее изученными – март–апрель, и отсутствуют данные по зимнему периоду, а также по периоду начала летнего половодья (табл. 1). Поэтому для января, февраля и июля были построены карты поверхностной солености по гидрологическим данным из базы данных WOD.

Рисунок 2а показывает распределение поверхностной солености в январе. 4 станции расположены в юго-западной части губы Буор-Хая, и одна станция находится в центре залива. Максимальная соленость (15 епс) наблюдается в центральной части губы Буор-Хая, на остальных станциях соленость составляет 5–10 епс. На рис. 2б показано распределение солености в феврале, построенное по данным измерений на 18 станциях. Эти станции преимущественно расположены в юго-западной части исследуемого района, одна станция находится в центре залива и одна – в устье Быков-

ской протоки. Максимальные значения (12 епс) солености зафиксированы в центральной части губы Буор-Хая, в юго-западной части губы соленость меняется в пределах 7–11 епс. Минимальные значения (2.2 епс) отмечены вблизи Быковской протоки.

Распределение поверхностной солености в марте показано на рис. 2в. 13 станций охватывают район вблизи придельтовой области между Быковской и Трофимовской протоками. Соленость вблизи проток находится в пределах 1–5 епс, на станциях более удаленных от проток соленость доходит до 10–11 епс. Апрель является наиболее изученным месяцем в течение периода, когда исследуемый район покрыт припайным льдом. Гидрологические станции охватывают практически всю губу Буор-Хая, но в основном сосредоточены в придельтовой области. Рисунок 2г показывает распределение солености в апреле. Относительно соленые воды (15–20 епс) губы Буор-Хая отделены от опресненных вод в акватории, прилегающей к восточной части дельты р. Лены (1–5 епс), четким фронтом, проходящим в 50 км к востоку от дельты.

Распределение поверхностной солености в июле, относящееся к начальному периоду половодья на р. Лене, показано на рис. 2д. Максимальные значения солености (20–25 епс) отмечены в областях к северу и северо-востоку от дельты Лены.

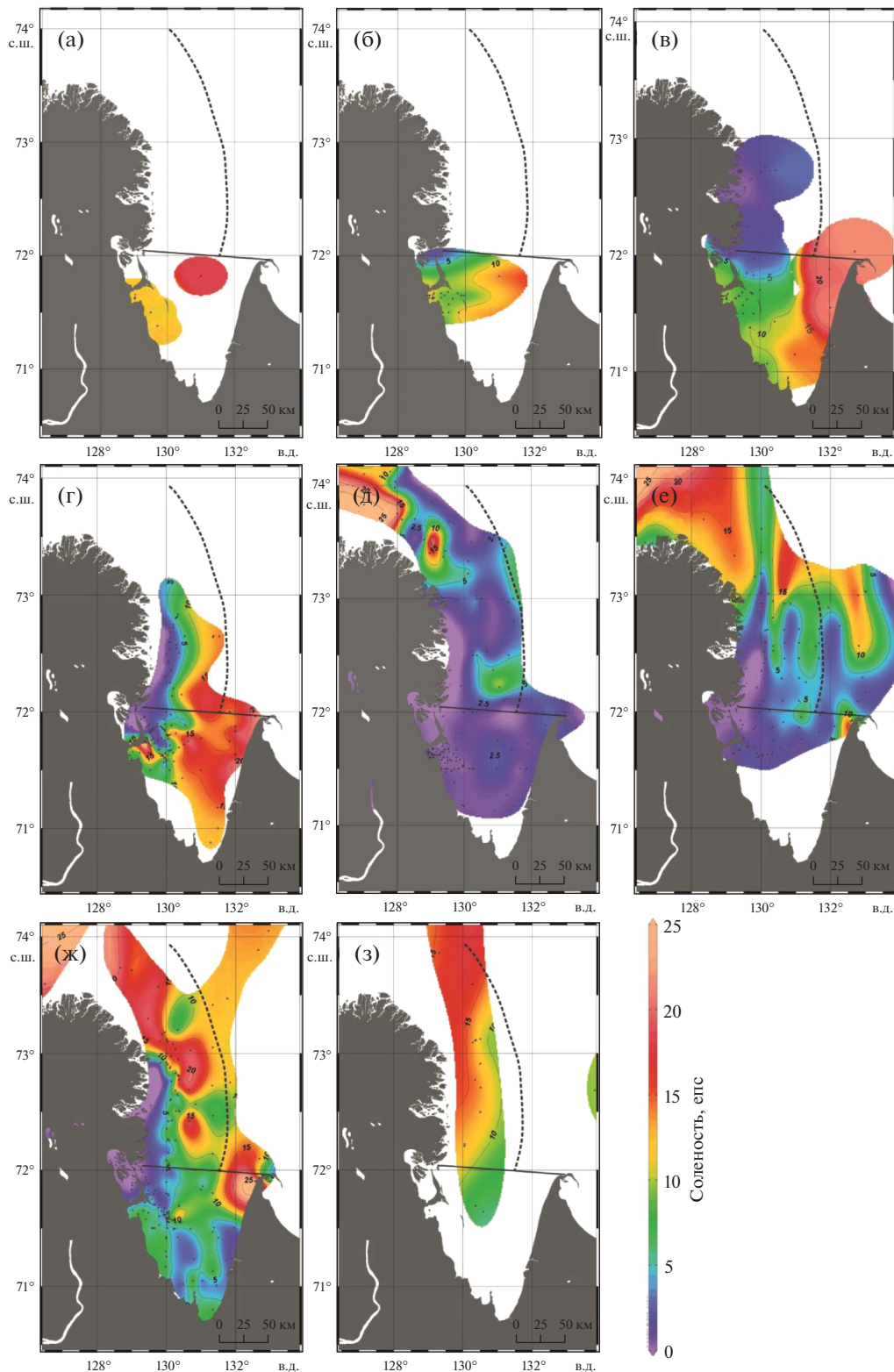


Рис. 2. Среднемесячное распределение поверхностной солености в январе (а), феврале (б), марте (в), апреле (г), июле (д), августе (е), сентябре (ж) и октябре (з) в акватории, прилегающей к восточной части дельты р. Лены, и в губе Буор-Хая на основе данных World Ocean Data Base (а, б, д) и данных экспедиций (в, г, е, ж, з). Точками указаны места измерений. Прерывистой линией обозначена граница приустьевой области. Сплошной линией обозначена губа Буор-Хая.

На наиболее близких к дельте станциях значения солености близки к 0 епс. В центре губы Буор-Хая поверхностная соленость не превышает 3 епс. На рис. 2е приведена карта поверхностной солености для августа. В этот период было сделано более 100 гидрологических станций во всей исследуемой акватории моря Лаптевых. Максимальные значения солености (15–25 епс) приурочены к областям к северу и северо-востоку от дельты р. Лены. Минимальные значения солености отмечаются в восточной и юго-восточной частях придельтовой области (1–3 епс), далее к востоку соленость незначительно возрастает. Большая часть губы Буор-Хая имеет поверхностную соленость в пределах 3–6 епс.

На рис. 2ж показано распределение солености в сентябре, который также является одним из наиболее изученных периодов, в течение которого было сделано более 100 гидрологических станций. Так же как и в августе, максимальные значения солености (15–25 епс) зафиксированы к северу и северо-востоку от дельты р. Лены. В губе Буор-Хая соленость незначительно повышена по сравнению с августом (5–8 епс). Наиболее опресненная (1–5 епс) область, находящаяся в придельтовой акватории, уменьшается в своих размерах и становится узкой полосой. Уже в небольшом удалении от дельты к востоку (25–50 км) значения солености поднимаются до 15–20 епс. Для октября натуральных гидрологических данных существенно меньше, чем для сентября (рис. 2з). Основная их часть сосредоточена в приустьевой области. В центральной части губы Буор-Хая выполнено две станции, поверхностная соленость на которых имеет значения 5–8 епс. В районе, прилегающем к дельте Лены, значения солености колеблются в пределах 12–16 епс.

По имеющимся натурным данным были рассчитаны средние значения температуры и солености по горизонтам с разрешением 1 м. По ним были построены вертикальные профили температуры и солености, иллюстрирующие сезонный ход этих характеристик в юго-восточной части моря Лаптевых, прилегающей к восточной части дельты р. Лены, и в губе Буор-Хая (рис. 3). В период с января по май воды в этих акваториях имеют относительно схожую структуру. В обеих акваториях соленость в поверхностном слое в основном изменяется от 0–1 до 12–16 епс. Тем не менее, стратификация у дельты Лены (с четкой двухслойной структурой) гораздо более сильная, чем в губе Буор-Хая (с относительно однородной стратификацией в слое 0–10 м). Подобные различия вертикальной структуры, по-видимому, вызваны, во-первых, поступлением небольшого, но значимого для формирования стратификации пресноводного стока из дельты Лены в период зимне-весенней межени и, во-вторых, адвекцией соленых вод в этот район из восточной части мо-

ря Лаптевых. Для относительно изолированной губы Буор-Хая, напротив, влияние и пресноводного стока, и адвекции соленых вод должно быть существенно меньше.

Ниже поверхностного слоя соленость постепенно возрастает вплоть до 25–27 епс в придонном слое на наиболее глубоководных станциях (глубиной 15–20 м). Температура моря относительно равномерно понижается с поверхности до дна, при этом в акватории, прилегающей к восточной части дельты р. Лены, температуры несколько выше (–0.5–0.5°C), чем в губе Буор-Хая (–1–0°C).

В летний сезон наблюдается четкая двухслойная структура во всем исследуемом регионе. Соленость поверхностного слоя в акватории, прилегающей к восточной части дельты Лены, принимает минимальные значения (0–6 епс), регистрируемые в течение года. На глубине 5–8 м соленость резко повышается до 20–22 епс, в придонном слое она доходит до 27–28 епс. В губе Буор-Хая поверхностная соленость также имеет минимальные сезонные значения (0–4 епс) и после резкого скачка солености на глубине 6–7 м возрастает ко дну до 27–28 епс. Средняя температура в придельтовой области меняется от 10–16°C на поверхности до –1°C у дна, а в губе Буор-Хая от 4–14°C на поверхности до –0.5°C у дна.

В осенний сезон сохраняется двухслойная структура во всем исследуемом регионе. Средняя поверхностная соленость в акватории, прилегающей к восточной части дельты Лены, повышается до 8 епс. В губе Буор-Хая средняя поверхностная соленость повышается менее сильно и составляет 5 епс. Средняя соленость в придонном слое имеет значения 28–29 епс для обеих исследуемых акваторий. Средняя поверхностная температура в обеих акваториях составляет 4.5°C, а температура придонного слоя – 0.5°C в придельтовой области и –0.5 в губе Буор-Хая.

3.2. Синоптическая изменчивость. Для оценки синоптической изменчивости были проанализированы непрерывные измерения температуры и солености в поверхностном слое, полученные в ходе 73-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2018 г. В период с 1 по 5 октября были проведены измерения вдоль шести параллельных меридиональных галсов от 72.5° до 73.5° с.ш., расположенных на различном расстоянии (от 35 до 50 км) к востоку от дельты Лены. Распределения температуры и солености показали значительную пространственную неоднородность, по-видимому, вызванную неоднородностью размеров дельтовых протоков и поступающего из них материкового стока (рис. 4). Области минимальных значений температуры и солености были приурочены к наиболее крупным Трофимовской и Сардахской протокам. Кроме того, наблюдаемое неоднород-

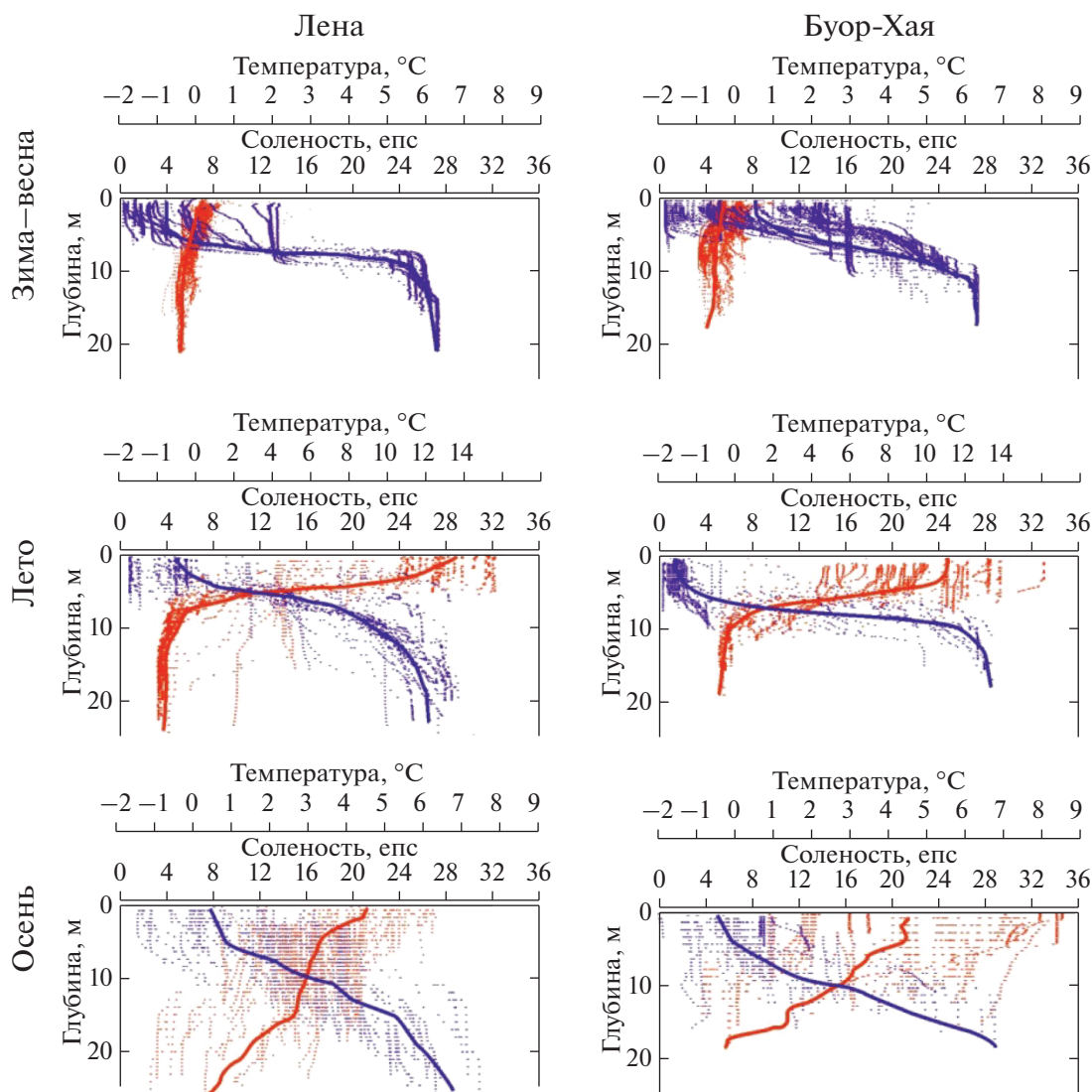


Рис. 3. Характерные вертикальные профили температуры (красные линии) и солёности (синие линии) в акватории, прилегающей к восточной части дельты р. Лены (слева) и в губе Буор-Хая (справа) в зимне-весенний (сверху), летний (в середине) и осенний (снизу) сезоны года.

ное распределение термохалинных характеристик поверхностного слоя также определяется региональной циркуляцией, в том числе интенсивной вихревой динамикой, типичной для фронтальных зон [23, 24, 44]. Действительно, распределение термохалинных характеристик в поверхностном слое характеризовалось значительными градиентами, на ряде участков длиной 5–7 км солёность и температура изменялись более чем на 5 епс и 1°C соответственно. Максимальные значения солёности в ходе измерений на полигоне составляли 15–16 епс.

В процессе экспедиционных работ был зафиксирован отклик наиболее опресненной придельтовой части плюма Лены (с солёностью меньше

10 епс), формируемого поступлением речного стока из дельты Лены в период осенней межени на изменчивость локального ветрового воздействия. В течение 30 сентября–1 октября в районе работ наблюдался очень слабый (~2–3 м/с) восточный ветер. Измерения в поверхностном слое, проведенные вдоль четырех галсов в этот период, показали, что придельтовая часть плюма Лены распространялась в восточном направлении. Солёность поверхностного слоя монотонно росла по мере увеличения расстояния галсов от берега от 0–10 епс на наиболее близком галсе до 8–16 епс на наиболее удаленном. В течение 2–3 октября ветер усилился до 8 м/с и изменил свое направление на северное. Измерения, проведенные вдоль

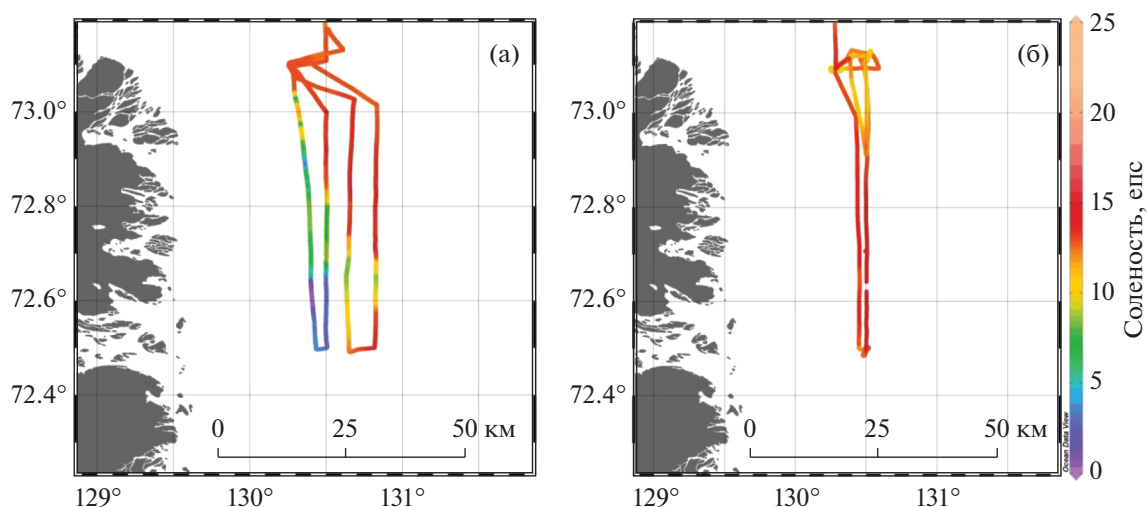


Рис. 4. Распределение поверхностной солености за период 1–3 октября (а) и 3–5 октября 2018 г. (б) вдоль трека судна к востоку от дельты Лены.

двух галсов в этот период, показали существенный рост солености на 8–10 епс в районе работ. По-видимому, в результате ветрового воздействия придельтовая часть плюма оказалась прижата к берегу, ее граница менее чем за сутки сдвинулась на расстояние в 20 км.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе описана структура плюма р. Лены в акватории, прилегающей к восточной части дельты реки, и в губе Буор-Хая. На основе натуральных гидрологических данных была установлена ярко выраженная сезонная изменчивость поверхностной солености в исследуемом регионе. В зимне-весенний период наблюдаются максимальные сезонные значения солености в поверхностном слое во всем исследуемом регионе (рис. 2а–2г, 3). Начало летнего половодья в нижнем течении Лены вызывает резкое увеличение пресноводного стока из проток ее дельты в море. Это приводит к существенному опреснению поверхностного слоя в акватории, прилегающей к восточной части дельты Лены (рис. 2д). Далее в течение летнего периода этот формирующийся опресненный слой достигает мелководной губы Буор-Хая, заполняет ее от поверхности до дна в мелководной южной части залива и формирует опресненный поверхностный слой в более глубокой северной части залива глубиной до 12 м (рис. 2д, 2е, 3). Это приводит к понижению солености и аккумуляции пресноводного стока в этом заливе.

В период от начала половодья в дельте Лены (в июне) до конца ледового сезона (в первой половине августа) плюм Лены экранирован льдом от воздействия ветра и его распространение опре-

деляется в первую очередь гравитационными силами. Во время половодья происходит резкий и длительный (в течение месяца) выброс пресных вод по всему периметру восточной части дельты Лены. Поступающие пресные воды под действием гравитационных сил, направленных от дельты, распространяются относительно однородным слоем в поверхностном слое моря и достаточно быстро формируют область опреснения с зональной и меридиональной протяженностью размерами в сотни километров. Граница плюма Лены в летний период расположена в сотнях километров от дельты и губы Буор-Хая [32]. Подобный механизм первичного формирования опресненного поверхностного слоя в период половодья для рр. Обь и Енисей, впадающих в Карское море, был описан в работе [29]. В результате этого опресненные воды поступают в близлежащий к дельте залив Буор-Хая в начале лета непосредственно в результате действия гравитационных сил.

Осеннее падение стока р. Лены приводит к постепенному увеличению солености поверхностного слоя в относительно глубоководном районе, расположенном к востоку от дельты, в результате его вертикального перемешивания с нижележащими более солеными водами и латерального перемешивания с расположенными к северу более солеными водами (рис. 2ж, 2з, 3). Это приводит к уменьшению площади наиболее опресненной части поверхностного слоя (с соленостью меньше 10 епс), формируемого снизившимся, но все еще поступающим речным стоком из дельты Лены. Расположение границы этой области в районе восточной части дельты Лены нестабильно и может смещаться на десятки километров менее чем за сутки в результате ветрового воздействия (рис. 4).

Это приводит к существенной пространственной изменчивости поверхностной солености в этом районе на синоптическом временном масштабе и, по-видимому, интенсифицирует вертикальное перемешивание между наиболее опресненной придельтовой частью плюма Лены и нижележащими более солеными водами.

В то же самое время в осенний период соленость в губе Буор-Хая повышается быстрее, чем на мелководье у дельты Лены (из-за продолжающегося поступления речного стока из дельты), однако медленнее, чем в относительно глубоководном районе, расположенном к востоку от дельты реки (рис. 2ж, 2з, 3). По-видимому, это вызвано существенно менее интенсивным поступлением соленых морских вод в мелководную и полуизолированную губу Буор-Хая по сравнению с открытой и более глубокой акваторией к востоку от дельты р. Лены. В результате этого средняя поверхностная соленость в губе Буор-Хая (4–6 епс) оказывается меньше, чем средняя поверхностная соленость в акватории, расположенной к востоку от дельты Лены (8–9 епс) (рис. 2б). В дальнейшем в отсутствие притока опресненных вод соленость в заливе повышается до максимальных сезонных значений и остается стабильной вплоть до начала летнего половодья.

По оценкам, полученным посредством численного моделирования плюма Лены [19], при скорости ветра более 4 м/с распространение плюма Лены в значительной степени определяется ветром (по сравнению с гравитационными силами), а при скорости ветра более 8 м/с – практически полностью определяется ветром. В исследуемом районе в безледный период (август–октябрь), по данным наблюдений на метеостанции Тикси в 2005–2020 гг., ветер более 4 м/с наблюдается в течение 58% дней, а ветер более 8 м/с – в течение 20% дней. При этом в открытой части моря скорость ветра существенно выше, чем на берегу в Тикси. Так, в юго-восточной части моря Лаптевых среднее количество дней со скоростью ветра более 15 м/с составляет 28 дней в период с августа по октябрь, то есть около трети всего безледного периода [34].

Дрейфовая скорость распространения плюма Лены под воздействием ветра u_w может быть оценена с помощью уравнения $u_w = \sqrt{\frac{\rho_a C_{10}}{\rho_p C_{Da}}} U$, где ρ_a – плотность воздуха, C_{10} – коэффициент шероховатости поверхности моря, C_{Da} – коэффициент донного трения для мелкой воды, U – скорость ветра [42]. Задавая $C_{10} = 1.2 \times 10^{-3}$, $C_{Da} = 2 \times 10^{-3}$, получаем, что $u_w = (1.3/10^3 \times 1.2 \times 10^{-3} / (2 \times 10^{-3}))^{0.5} U = 0.03 U$. Таким образом, типичные значения скорости u_w оцениваются от 0.15 м/с (при ветре скоростью 5 м/с) до 0.45 м/с (при ветре

скоростью 15 м/с). По данным метеостанции в Тикси, с 2005 по 2020 гг. в сентябре ветры, способствующие аккумуляции опресненных вод в губе Буор-Хая (от юго-западных до северных), наблюдаются в течение 61% времени, а ветры, выносящие опресненные воды из губы (от северо-восточных до южных) – 32% времени. Таким образом, ветер в исследуемом регионе способствует аккумуляции опресненных вод в губе Буор-Хая.

Важным механизмом переноса опресненных вод в исследуемом районе также является направленное на юг геострофическое течение вдоль восточной части дельты Лены. Подобное течение, формирующееся в период пониженного стока в конце лета и осенью, также способствует аккумуляции опресненных вод в губе Буор-Хая. Скорость подобного геострофического вдольберегового течения u_g для плюма Лены можно оценить с

помощью уравнения $u_g = \frac{g \rho_s - \rho_p}{f \rho_s} \frac{h}{L}$, где g – ускорение свободного падения, f – частота Кориолиса, ρ_p и ρ_s – плотности вод плюма и окружающего моря, h – толщина вдольберегового течения, L – ширина вдольберегового течения [35]. В среднем для плюма Лены в сентябре (месяце, наиболее обеспеченном натурными данными) эта скорость u_g оценивается от $10 / (1.4 \times 10^{-4}) \times 1.5 / 10^3 \times 5 / (5 \times 10^3) \sim 0.1$ м/с до $10 / (1.4 \times 10^{-4}) \times 3.5 / 10^3 \times 5 / (5 \times 10^3) \sim 0.25$ м/с.

Итак, скорости дрейфовых (ветровых) течений для рассматриваемой области плюма Лены в конце лета и осенью оказываются одного порядка со скоростями геострофических течений. Тем не менее, роль ветрового переноса, по-видимому, оказывается более значимой для распространения плюма, что согласуется с выводами в работе [19]. Однако приведенные выше оценки скорости течения в плюме Лены являются весьма условными, так как они не учитывают многие важные условия, такие как время установления геострофического течения, сложную морфологию берега и морского дна (влияние мысов и островов дельты, а также мелководья на течение), неоднородность поля солености в плюме и окружающем море и т.д. Более точные оценки направления и скорости циркуляции в плюме Лены в исследуемом районе требуют проведения специализированных натурных измерений скорости течения.

Структура вод в заливе в осенний период характеризуется низкой пространственно-временной изменчивостью на синоптическом временном масштабе. В частности, максимальная вариация солености в губе Буор-Хая в пределах суточных измерений в сентябре составляла 5 епс (рис. 5), в то время как в придельтовой области вариация солености во время измерений 1–5 октября 2018 г. составляла 10–15 епс на расстоянии

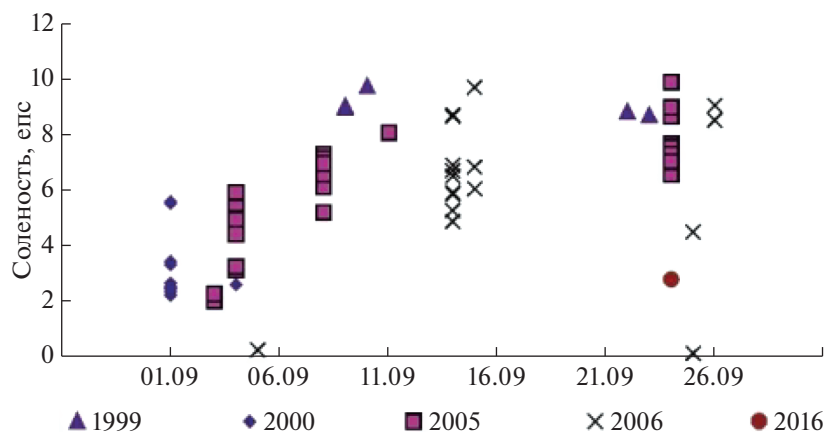


Рис. 5. Значения поверхностной солёности в сентябре на основе данных 5 экспедиций в 1999, 2000, 2005, 2006 и 2016 гг.

10–20 км. В губе Буор-Хая в осенний период не образуются столь резкие горизонтальные градиенты солёности, как в придельтовой области из-за удаленности губы Буор-Хая от источника материкового стока. Из-за этого под действием ветра поверхностная солёность в губе Буор-Хая характеризуется меньшими горизонтальными градиентами и, тем самым, существенно меньшей пространственно-временной изменчивостью на синоптическом временном масштабе, по сравнению с придельтовой областью.

Сравнительно небольшой сток р. Лены в период межени с конца осени по конец весны продолжает формировать область опреснения, однако лишь на небольшой площади, непосредственно прилегающей к дельте (рис. 2б–2г). Уже в 25–50 км к востоку от дельты сток Лены не оказывает такого значительного влияния на поверхностную солёность и уже в сентябре–октябре она повышается до 10–15 eps и более (рис. 2ж, 2з). При этом поверхностная солёность в губе Буор-Хая остается менее 10 eps в сентябре и октябре, а зимой и весной поверхностная солёность более 15 наблюдалась в марте и апреле только в восточной части залива (рис. 2а–2г).

Итак, пресноводный сток, аккумулирующийся в губе Буор-Хая в течение летнего периода, сохраняется в ней дольше, чем в относительно глубокой акватории, расположенной к востоку от дельты р. Лены. Таким образом, губа Буор-Хая за счет своего географического положения, морфологии и донной топографии играет роль своеобразного стабильного резервуара пресных речных вод в летне-осенний период. Если определить в качестве границы губы Буор-Хая линию между мысом Буор-Хая и входом в Быковскую протоку Лены, то, по данным цифровой базы данных донной топографии ИВСаО [22], площадь губы Буор-Хая составляет около 11 000 км². На основе верти-

кального распределения средней аномалии солёности в осенний период (рис. 3) и донной топографии губы Буор-Хая был рассчитан общий объем аккумулированной пресной речной воды в губе Буор-Хая в течение летне-осеннего периода, который составил 84 км³.

Этот значительный объем составляет 14% всего годового стока р. Лена и превышает суммарный годовой сток крупных рр. Яна и Оленек, впадающих в прилегающие районы моря Лаптевых. Более того, этот объем сравним с общим стоком р. Лены за август и сентябрь. Таким образом, залив Буор-Хая играет роль значимого вторичного источника опресненных и теплых вод в юго-восточной части моря Лаптевых как минимум в осенний период. Это, по-видимому, продлевает период поступления опресненных и теплых вод в юго-восточную часть моря Лаптевых и оказывает влияние на формирование термохалинной циркуляции, ледообразование, термоабразию берега, состояние подводной мерзлоты и многие другие региональные физические, биологические и геохимические процессы. К середине весны опресненные и теплые воды уже отсутствуют в заливе Буор-Хая, что говорит об их диссипации с октября по апрель. Для более точной оценки времени диссипации этих вод в заливе необходимо проведение дополнительных натурных измерений по всей акватории залива в зимний период.

Подобный эффект, описанный для плюма р. Лена и губы Буор-Хая, обусловлен сочетанием трех основных факторов. Во-первых, практически полным прекращением речного стока в течение длительного периода (более полугодия), что приводит к значительным сезонным колебаниям солёности, а именно, плюм Лены успевает очень сильно перемешаться с поступающими солеными водами. Во-вторых, формированием плюма Лены дельтовой, а не эстуарной рекой, что приво-

дит к зимне-весеннему перемешиванию ее плюма и увеличению солености непосредственно у источника, т.е. у дельты Лены. В-третьих, наличием большого по площади и объему, но относительно мелководного (глубина сравнима с толщиной плюма Лены) и изолированного залива (губа Буор-Хая) около дельты Лены.

Именно сочетание этих трех факторов и приводит к уникальной ситуации, нетипичной для плюмов других крупных рек, — сток у реки уже упал, но большей объем опресненных вод, аккумуляировавшийся в стороне от пресноводного источника, продолжает поступать в море в течение длительного периода. В определенном смысле аналогом губы Буор-Хая как вторичного источника материкового стока могут служить Обская губа и Амурский лиман, где также в зимне-весенний период сохраняется значительный объем опресненных вод и происходит водообмен с Карским и Охотским морями соответственно [5, 29]. Однако в этом случае аккумуляция происходит в эстуарии и вторичный источник материкового стока совпадает с первичным, что отличает этот пример (и аналогичные ему примеры эстуарных рек) от р. Лены и губы Буор-Хая. Сочетания же всех трех факторов, кроме Лены, нет ни у одной реки, чей годовой сток превышает 100 км³, т.е. ни у одной из 30 наиболее полноводных рек мира.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства Науки и Высшего Образования РФ, тема 0128-2021-0001 (обработка натуральных данных); Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта 20-35-70039 (исследование речных плюмов); гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук в рамках проекта МК-98.2020.5 (исследование пресноводного пеленоса).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Куксина Л.В. и др. Структура водотоков в дельте Лены и ее влияние на процессы трансформации речного стока // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 91–99.
2. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Семилетов И.П. и др. Особенности современного морфолитогенеза на шельфе моря Лаптевых: Семеновское мелководье (“Земля Васема”) // Докл. АН. 2015. Т. 462. № 2. С. 223–229.
3. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В. и др. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
4. Нигаматзянова Г.Р., Фролова А.А., Четверова А.А. и др. Гидробиологические исследования проток устье-вой области реки Лены // Ученые записки Казанского Университета. 2015. Т. 157. № 4. С. 96–108.
5. Осадчиев А.А. Распространение плюма реки Амур в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 417–424.
6. Савельева Н.И., Салюк А.Н., Пронн Л.Н. Особенности термохалинной и гидрохимической структуры вод Юго-восточной части моря Лаптевых // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 869–876.
7. Суханова И.Н., Флинт М.В., Георгиева Е.Ю. и др. Структура фитопланктонных сообществ в восточной части моря Лаптевых // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 75–90.
8. Четвертова А.А., Федорова И.В., Фролова Л.А. и др. Особенности формирования качественных характеристик вод и наносов в дельте реки Лены // Ученые записки Казанского Университета. 2017. Т. 159. № 1. С. 122–138.
9. Aagaard K., Carmack E.C. The Arctic Ocean and climate: A perspective, in The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment // Geophysical Monography Series. Washington, D.C.: AGU, 1994. V. 85. P. 5–20.
10. Boyer T.P., Antonov J.I., Baranova O.K. et al. World Ocean Database 2013. NOAA Atlas NESDIS 72. Levitus S. (ed.), Mishonov A. (Technical ed.) MD, USA: Silver Spring, 2013.
11. Bulgakov N.P. Determination of functional graphs of the time at which water reaches the freezing point and the depth of density mixing // Probl. North. 1962. V. 4. P. 141–148.
12. Carmack E.C. The alpha/beta ocean distinction: A perspective on freshwater fluxes, convection, nutrients and productivity in high-latitude seas // Deep Sea Res., Part II. 2007. V. 54. Is. 23–26. P. 2578–2598.
13. Carmack E.C., Winsor P., Williams W. The contiguous panarctic Riverine Coastal Domain: A unifying concept // Prog. Oceanogr. 2015. V. 139. P. 13–23.
14. Dai A., Trenberth K.E. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations // J. Hydrometeorol. 2002. V. 3. P. 660–687.
15. Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Bloskhina E. et al. Tide-induced vertical mixing in the Laptev Sea coastal polynya // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. C00G14. <https://doi.org/10.1029/2011JC006966>
16. Dmitrenko I., Kirillov S., Eicken H. et al. Wind-driven summer surface hydrography of the eastern Siberian shelf // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L14613.
17. Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay L.B. The long-term and interannual variability of summer freshwater storage over the eastern Siberian Shelf: Implication for climatic change // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. C03007. <https://doi.org/10.1029/2005GL023022>
18. Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyakov D. et al. Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations // Biogeosci. 2015. V. 12. P. 345–363.

19. *Fofonova V., Danilov S., Androsov A. et al.* Impact of wind and tides on the Lena River freshwater plume dynamics in the summer sea // *Ocean Dyn.* 2015. V. 65. P. 951–968.
20. *Gleick P.H.* The World's Water 2000–2001. Washington, D.C.: Island Press, 2000. P. 39–61.
21. *Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov J.S. et al.* A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // *Am. J. Sci.* 1996. V. 296. P. 664–691.
22. *Jakobsson M., Mayer L., Coakley B. et al.* The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L12609. <https://doi.org/10.1029/2012GL052219>
23. *Kozlov I.E., Artamonova A.V., Manucharyan G.E. et al.* Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2019. V. 124. Is. 9. P. 6601–6616.
24. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // *Deep Sea Res. I.* V. 97. P. 80–91.
25. *Li W.K.W., McLaughlin F.A., Lovejoy C. et al.* Smallest algae thrive as the Arctic Ocean freshens // *Science.* 2016. V. 326. P. 539. <https://doi.org/10.1126/science.1179798>
26. *McLaughlin F.A., Carmack E.C.* Deepening of the nutricline and chlorophyll maximum in the Canada Basin interior, 2003–2009 // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. Is. 24. L24602. <https://doi.org/10.1029/2010GL045459>
27. *Nummelin A., Ilicak M., Li C. et al.* Consequences of future increased Arctic runoff on Arctic Ocean stratification, circulation, and sea ice cover // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2016. V. 121. Is. 1. P. 617–637.
28. *Osadchiev A.A., Asadulin En.E., Miroshnikov A.Yu. et al.* Bottom sediments reveal inter-annual variability of interaction between the Ob and Yenisei plumes in the Kara Sea // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. 18642. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55242-3>
29. *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. Geophys. Res.: Oceans.* 2021. V. 126. Is. 1. e2020JC016486. <https://doi.org/10.1029/2020JC016486>
30. *Osadchiev A.A., Izhitskiy A.S., Zavalov P.O. et al.* Structure of the buoyant plume formed by Ob and Yenisei river discharge in the southern part of the Kara Sea during summer and autumn // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2017. V. 122. Is. 7. P. 5916–5935.
31. *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 Sci.* 2020. V. 16. Is. 4. P. 1–18.
32. *Osadchiev A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A. et al.* Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East-Siberian seas // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. 13041. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70096-w>
33. *Osadchiev A.A., Silvestrova K.P., Myslenkov S.A.* Wind-driven coastal upwelling near large river deltas in the Laptev and East-Siberian seas // *Rem. Sens.* 2020. V. 12. Is. 5. 844. <https://doi.org/10.3390/rs12050844>
34. *Pavlov V.K., Timokhov L.A., Baskakov G.A. et al.* Hydrometeorological regime of the Kara, Laptev, and East-Siberian Seas // *Technical Memorandum APL-UWTM1-96.* Seattle, Washington, USA, 1996. 185 p.
35. *Pimenta F.M., Kirwan Jr. A.D.* The response of large outflows to wind forcing // *Cont. Shelf Res.* 2014. V. 89. P. 24–37.
36. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Rember R. et al.* Winter convection transports Atlantic water heat to the surface layer in the eastern Arctic Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 2013. V. 43. P. 2142–2155.
37. *Semiletov I., Pipko I., Gustafsson O. et al.* Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nature Geosci.* 2016. V. 9. P. 361–365.
38. *Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. et al.* Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion // *Biogeosci.* 2011. V. 8. Is. 9. P. 2407–2426.
39. *Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I. et al.* On carbon transport and fate in the East Siberian Arctic land–shelf–atmosphere system // *Environ. Res. Lett.* 2012. V. 7. 015201. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015201>
40. *Tremblay J.E., Gagnon J.* The effects of irradiance and nutrient supply on the productivity of Arctic waters: A perspective on climate change // *Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Subarctic Conditions.* Nihoul C.J., Kostianoy A.G. (eds.). Springer Science, Berlin. 2009. P. 73–92.
41. *Weingartner T.J., Danielson S., Yasunori S. et al.* The Siberian Coastal Current: A wind- and buoyancy-forced Arctic coastal current // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. Is. C12. P. 29697–29713.
42. *Whitney M.M., Garvine R.W.* Wind influence on a coastal buoyant outflow // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Is. C4. C03014. <https://doi.org/10.1029/2003JC002261>
43. *Yamamoto-Kawai M., McLaughlin F.A., Carmack E.C. et al.* Surface freshening of the Canada Basin, 2003–2007: River runoff versus sea ice meltwater // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. Is. C1. C00A05. <https://doi.org/10.1029/2008JC005000>
44. *Zatsepin A., Kubryakov A., Aleskerova A. et al.* Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea // *Ocean Dyn.* 2019. V. 69. P. 253–266.

Structure and Variability of the Lena River Plume in the South-Eastern Part of the Laptev Sea

E. A. Spivak^a, A. A. Osadchiev^{b, #}, I. P. Semiletov^a

^a*Ilyichov Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

^b*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: osadchiev@ocean.ru*

This work is focused on structure and seasonal variability of the most freshened part of the Lena plume in the south-eastern part of the Laptev Sea, namely, at sea area adjacent to the eastern part of the Lena Delta and in the Buor-Khaya Bay. Based on in situ hydrological data, it is shown that accumulation of the freshwater discharge of the Lena River occurs in the Buor-Khaya Bay during the summer period. In autumn reduced salinity in this semi-isolated and shallow gulf remains significantly longer time than in the area adjacent to the eastern part of the Lena Delta that is not typical for large river plumes. As a result, the Buor-Khaya Bay plays a role of a reservoir of freshwater discharge during long autumn-winter period. Moreover, this gulf is a secondary source of freshened and warm water in the south-eastern part of the Laptev Sea which volume is similar to the discharge volume of the Lena River during the autumn-winter drought.

Keywords: river plume, surface salinity, seasonal variability, Laptev Sea, Lena River, Buor-Khaya Bay