

## ПЕРЕНОС И ТРАНСФОРМАЦИЯ РЕЧНОГО СТОКА В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

© 2021 г. А. А. Осадчиев

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

*E-mail: osadchiev@ocean.ru*

Поступила в редакцию 23.05.2021 г.

После доработки 26.06.2021 г.

Принята к публикации 10.07.2021 г.

В статье рассматриваются результаты исследований пресноводного стока великих сибирских рек Оби, Енисея и Лены в российском секторе Северного Ледовитого океана. Стоки этих рек формируют области опреснения суммарной площадью в сотни тысяч квадратных километров, которые влияют на многие климатические, физические, биологические и геохимические процессы в морях российской Арктики. На основе исследований последних лет показано, что опреснённый поверхностный слой в Восточной Арктике имеет неоднородную структуру, динамику распространения, сезонную и межгодовую изменчивость вследствие его формирования крупными эстуарными реками в Карском море и крупной дельтовой рекой в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море. Обсуждается проблема крупномасштабного межбассейнового переноса опреснённого поверхностного слоя на российском арктическом шельфе, являющегося важным компонентом цикла пресной воды в Северном Ледовитом океане.

*Ключевые слова:* речной сток, речной плюм, опреснённый поверхностный слой, поверхностная циркуляция, климатические процессы, Обь, Енисей, Лена, Северный Ледовитый океан.

**DOI:** 10.31857/S0869587321120082

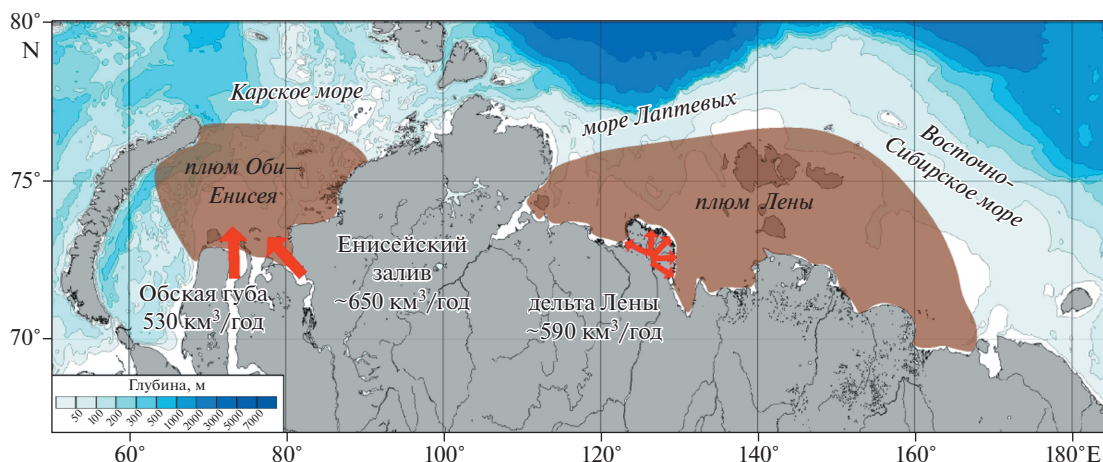
При впадении рек в море образуются речные плюмы – опреснённые водные массы, формирующиеся в результате перемешивания речного стока и солёных морских вод. Речные плюмы образуются в прибрежных морских акваториях во многих регионах мира и зачастую представляют собой большой по площади, но тонкий поверхностный слой моря. Речные плюмы играют важную роль в глобальных и региональных процессах взаимодействия океана и суши. С речным стоком в Мировой океан поступают значительные пото-

ки плавучести, тепла, терригенной взвеси, биогенных веществ и антропогенных загрязнений [1–6]. Речные плюмы, являясь переходной водной массой между речным стоком и морскими водами, обеспечивают трансформацию и перераспределение этих потоков и тем самым играют роль связующего звена между материковыми и океаническими природными системами. Поэтому речные плюмы существенно влияют на многие физические, биологические и геохимические процессы в прибрежных и шельфовых районах моря, включая формирование стратификации морских вод, прибрежные течения, цикл углерода и биогенов, формирование первичной продукции, изменение морфологии морского дна и т.д. [7–9]. Структура, динамика и изменчивость речных плюмов – ключевые факторы для понимания механизмов адвекции, конвекции, трансформации, накопления и диссипации в море материкового стока, а также взвешенных и растворённых веществ речного происхождения [10–13].

В русскоязычной научной литературе на протяжении долгого времени не было единого термина для речных плюмов как отдельных водных



ОСАДЧИЕВ Александр Александрович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.



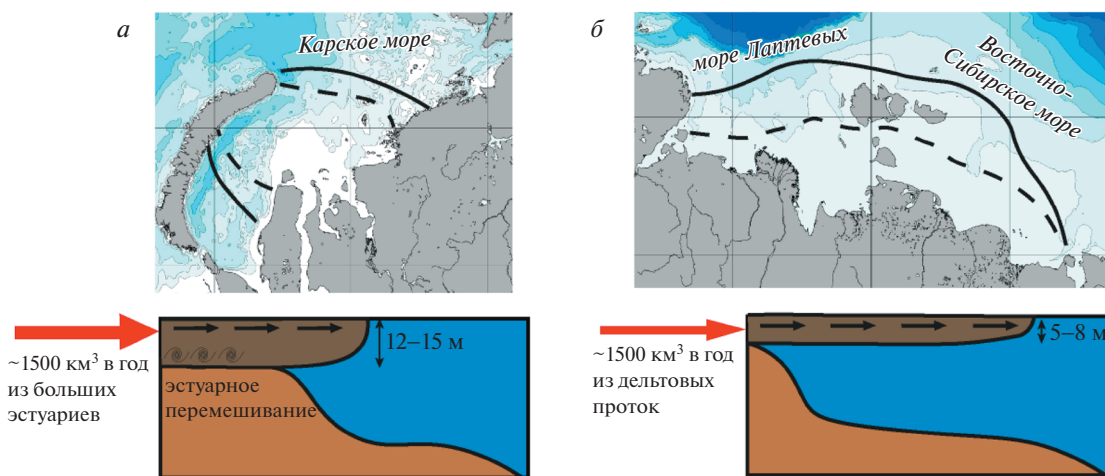
**Рис. 1.** Расположение и средний годовой сток из Обской губы, Енисейского залива и дельты Лены; области распространения плюма Оби–Енисея в Карском море и плюма Лены в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море

масс. Для их обозначения использовались разные термины, такие как “выносы”, “стоки”, “факелы”, “шлейфы”, “плюмажи”, “линзы”, “зоны опреснения” и т.д. “Плюм” – термин в гидродинамике, обозначающий поток жидкости или газа, распространяющийся в среде жидкости или газа, имеющей другую плотность. Этот термин в употреблении многих лет широко используется в русскоязычной научной литературе для описания подобных процессов в различных областях наук о Земле, в первую очередь, это “мантийный плюм” [14, 15], а также “гидротермальный плюм” [16, 17], “конвективный плюм” [18], “метеороидный плюм” [19]. Первые научные статьи в российских журналах, в которых использовался термин “речной плюм”, появились в 2010–2011 гг. [20–22]. К настоящему моменту опубликованы десятки научных статей, в которых активно используется термин “речной плюм”, и он стал общепринятым в русскоязычной научной литературе.

Северный Ледовитый океан – единственная часть Мирового океана, где взаимодействие материкового стока и морских вод влияет на процессы в глобальном масштабе. В Северный Ледовитый океан, занимающий всего 3% площади поверхности и 1% объема Мирового океана, поступает значительный материковый сток, составляющий около 11% суммарного мирового стока в океан [23], в результате чего формируются крупные по площади речные плюмы. Распространение и перемешивание речных плюмов определяют стратификацию моря в области формирования сезонного морского льда, тем самым влияя на ледообразование в Северном Ледовитом океане, сезонные колебания альбедо Земли и планетарный климат [24, 25]. Пресноводный сток оказывает существенное влияние на многие региональные процессы в Арктике, особенно в прибрежных и

шельфовых районах [24, 26–29]. Значительные объемы взвешенных и растворенных веществ, поступающих в море с речным стоком, удерживаются в приустьевых зонах и влияют на гидрохимическую и гидробиологическую структуру вод на арктическом шельфе [30]. Стратификация, формируемая пресноводным стоком, ограничивает поступление биогенов в поверхностный слой моря и негативно влияет на биологическую продуктивность на обширных акваториях в Карском море, море Лаптевых и Восточно-Сибирском море [31]. В то же время стратификация приводит к пониженному содержанию кислорода и повышению кислотности воды [32].

В последние десятилетия проводятся интенсивные исследования приустьевых и шельфовых зон в Арктике. В результате сложилось общее понимание пространственных и термохалинных характеристик речных плюмов, образованных арктическими реками. Три крупнейшие реки российского сектора Арктики – Енисей, Лена и Обь – обеспечивают более половины материкового стока в Северный Ледовитый океан [33–35]. Обь и Енисей впадают в крупные эстуарии (Обскую губу и Енисейский залив), расположенные недалеко друг от друга в центральной части Карского моря (рис. 1). Из-за этого плюм Оби и плюм Енисея формируются в приэстуарных акваториях и затем сливаются в единый плюм Оби–Енисея, локализованный в Карском море [36, 37]. Река Лена впадает в юго-восточную часть моря Лаптевых через обширную дельту – одну из крупнейших речных дельт мира [38]. Плюм Лены формируется в придельтовой акватории и распространяется далее в восточную часть моря Лаптевых и западную часть Восточно-Сибирского моря [39] (см. рис. 1).



**Рис. 2.** Межгодовая изменчивость расположения внешней границы плюма Оби–Енисея (а) и плюма Лены (б) в конце безлёдного периода (сплошная линия – среднегодовое максимум, пунктирная линия – среднегодовое минимум). Схема формирования плюма Оби–Енисея стоком из крупных эстуариев (а) и плюма Лены стоком из дельтовых протоков (б)

Процесс трансформации пресноводного стока в этих плюмах включает два последовательных этапа – горизонтальной адвекции летом и вертикального перемешивания осенью и зимой [40, 41]. Подавляющая часть годового стока арктических рек России поступает в Северный Ледовитый океан в течение нескольких месяцев летнего половодья, и в этот период формируются плюмы Оби–Енисея и Лены. Эти плюмы распространяются как тонкие (менее 15 м) и слабосолёные (менее 15 епс) водные массы по большой площади на шельфе Восточной Арктики. После окончания половодья солёность и толщина плюмов постепенно увеличиваются в результате их перемешивания с нижележащими морскими водами в условиях пониженного материкового стока. Практически полное отсутствие стока сибирских рек в течение длинной осенне-весенней межени приводит к окончательной диссипации опреснённого поверхностного слоя. К весне поверхностная солёность в Карском море, море Лаптевых и Восточно-Сибирском море повышается до фоновых значений.

При изучении плюмов Оби–Енисея и Лены возник интересный парадокс. Суммарный пресноводный сток, формирующий плюм Оби–Енисея в Карском море, по объёму в 1.5 раза превышает сток, формирующий плюм Лены в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море. Несмотря на это, площадь области опреснения в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море (300000–500000 км<sup>2</sup>) в 1.5–2 раза больше, чем в Карском море (200000–250000 км<sup>2</sup>) (рис. 2). Также очень сильно отличается межгодовая изменчивость площади распространения этих плюмов. Плюм Оби–Енисея каждый год занимает примерно од-

ну и ту же площадь в центральной части Карского моря, межгодовая изменчивость его внешней границы невелика [40] (см. рис. 2а). Положение и площадь плюма Лены, напротив, имеют значительную межгодовую изменчивость, определяемую ветровыми условиями в течение безлёдного периода года (июль–октябрь) [41] (см. рис. 2б). Преобладающие западные ветры вызывают смещение плюма в сторону побережья Сибири, в результате чего он оказывается локализован в южных частях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. В этом случае его меридиональная протяжённость (<250 км) и площадь (~300000 км<sup>2</sup>) относительно невелики. При сильных восточных ветрах, напротив, плюм Лены распространяется на большую площадь (до 500000 км<sup>2</sup>) в центральных частях этих морей, его меридиональная протяжённость увеличивается до 500–700 км. Исследования, проведённые в последние годы, позволили выяснить, почему так происходит.

На основе анализа натуральных данных, собранных в ходе нескольких десятков морских экспедиций за последние 20 лет, было показано, что толщина плюма Лены при его формировании в придельтовой акватории (5–8 м) примерно в 2 раза меньше толщины плюма Оби–Енисея (12–15 м) [40, 41]. Это различие обусловлено морфологией эстуарных и дельтовых источников пресной воды. Лена впадает в море Лаптевых через многочисленные узкие (до нескольких километров) и мелководные (до 5–10 м) дельтовые протоки вдоль 250-километрового участка берега моря, а Обь и Енисей впадают в Карское море через широкие (30–60 км) и глубокие (15–20 м) эстуарии. Из-за этого солёные морские воды практически не проникают в мелководные дельтовые протоки

Лены в отличие от глубоких эстуариев Оби и Енисея. Таким образом, пресноводный сток Лены поступает в море из многочисленных протоков и формирует относительно неглубокий плюм (см. рис. 2б). Стоки Оби и Енисея, напротив, интенсивно перемешиваются с солёной морской водой в эстуариях и образуют относительно глубокий плюм (см. рис. 2а).

Итак, во время своего первичного формирования плюм Лены имеет меньший вертикальный масштаб, но при этом растекается по большей площади моря, чем плюм Оби–Енисея. Этим фактором и объясняется большая площадь плюма Лены по сравнению с плюмом Оби–Енисея при меньшем объёме формирующего его речного стока. Тем же обусловлено и значительное межгодовое непостоянство плюма Лены, вызванное изменчивостью ветрового воздействия. Ветровой импульс практически не передаётся ниже границы между речным плюмом и нижележащим морем из-за резкого скачка плотности в этих слоях. В результате ветровая энергия концентрируется в относительно тонком приповерхностном слое, и интенсивность ветрового переноса речного плюма тем выше, чем меньше его толщина. Поэтому плюм Лены в значительно большей степени подвержен ветровому воздействию, чем плюм Оби–Енисея.

Важным, но до конца не изученным остаётся вопрос о судьбе речных плюмов в холодный период года. Как было показано выше, в Восточной Арктике летом и осенью формируются две большие области опреснения. Зимой эти акватории полностью покрываются льдом, из-за чего в них практически не ведутся натурные измерения, и структура плюмов в этот период не известна. Редкие измерения показывают, что весной перед началом половодья опреснение уже не отмечается. Возникает вопрос: как и куда оно уходит? Есть несколько возможных сценариев этого процесса. Во-первых, после падения речного стока и формирования зимнего ледового покрова речные плюмы могут целиком выноситься из областей их формирования. Из-за влияния силы Кориолиса это может происходить в двух возможных направлениях – на север в глубоководную центральную часть Северного Ледовитого океана и на восток вдоль побережья Сибири [25, 42, 43]. Во-вторых, речные плюмы могут перемешиваться в пределах шельфа, то есть непосредственно в местах их формирования в тёплый период года. Измерения, проводившиеся в последние 20 лет, показали, что в безлёдный период года часто происходит перенос плюмов Оби–Енисея и Лены в восточном направлении вдоль континентального побережья, а переноса в северном направлении за границу шельфа не наблюдается [44]. При этом восточный перенос не является ни стационарным, ни непрерывным и зависит как от регионального

ветрового воздействия, так и от количества пресной воды, накопленной в речном плюме [44, 45].

В конце октября 2020 г. в экспедиции на НИС “Академик Мстислав Келдыш” были проведены измерения в проливе Вилькицкого, разделяющем Карское море и море Лаптевых. Важность этих работ заключается в том, что измерения на траектории восточного переноса плюма Оби–Енисея впервые проводились поздней осенью непосредственно перед началом ледообразования, то есть в период максимального накопления пресноводного стока в плюме Оби–Енисея. Эти измерения впервые зафиксировали интенсивный зональный пресноводный перенос из Карского моря в море Лаптевых (рис. 3). Солёность поверхностного слоя по всей ширине пролива Вилькицкого была ниже, чем у источника пресной воды – у Обской губы. Таким образом, измерения показали начало интенсивного восточного переноса плюма Оби–Енисея из Карского моря в море Лаптевых, который, по-видимому, продолжается и после формирования ледового покрова. Этот результат свидетельствует в пользу доминирования восточного переноса речных плюмов, формирующихся в морях российской Арктики, в зимний период. Тем не менее для подтверждения этого вывода требуются дополнительные измерения, в первую очередь долговременные измерения солёности на стационарных станциях на северных и восточных окраинах исследуемых морей в зимний период.

\*\*\*

Северный Ледовитый океан – единственная область Мирового океана, где взаимодействие материкового стока и морских вод влияет на процессы в глобальном масштабе. Крупные реки, впадающие в Северный Ледовитый океан, в первую очередь Лена, Енисей и Обь, формируют области опреснения в российском секторе Арктики площадью в сотни тысяч квадратных километров. Распространение и перемешивание речного стока в Арктике определяет стратификацию моря в области формирования сезонного морского льда, тем самым влияя на ледообразование в Северном Ледовитом океане, сезонные колебания альбедо Земли и планетарный климат.

В условиях происходящих климатических изменений (увеличение речного стока и сокращение морского льда в Северном Ледовитом океане) большое значение приобретают специализированные исследования современного состояния цикла пресной воды в Арктике. Изучение процессов распространения и перемешивания стока великих сибирских рек в морях российской Арктики, проводящееся в течение последних 20 лет, позволило детально проследить структуру, динамику и изменчивость плюмов Оби–Енисея и Лены. Было установлено, что первичное формиро-

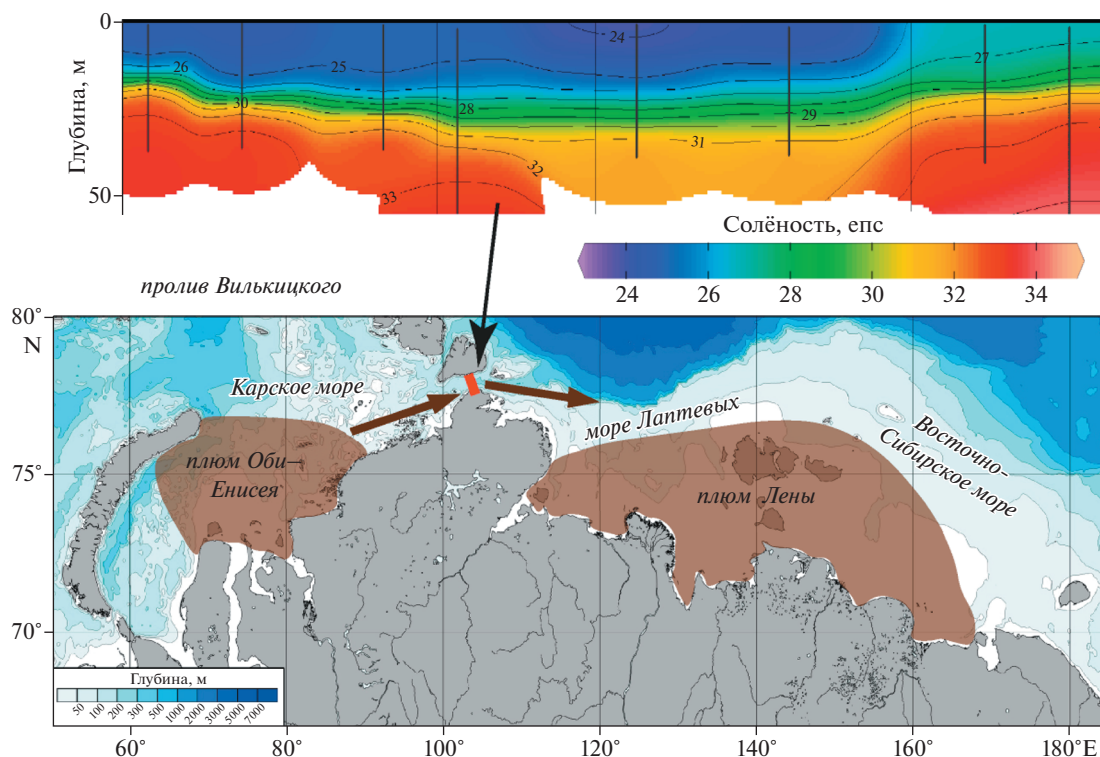


Рис. 3. Распределение солёности поперёк пролива Вилькицкого (красная линия на карте) в конце октября 2020 г. (сверху), иллюстрирующее интенсивный пресноводный перенос из Карского моря в море Лаптевых (коричневые стрелки на карте) (снизу)

вание этих речных плумов в приэстуарных и придельтовых акваториях крупных рек определяет гидрологическую структуру опреснённого поверхностного слоя моря в масштабах всего шельфа Восточной Арктики. Благодаря полученным данным складываются принципиально новые представления о внутренней структуре, динамике распространения, сезонной и межгодовой изменчивости крупномасштабного поверхностного опреснённого слоя на шельфе морей российской Арктики.

Результаты проведённых исследований создают основу для изучения многих физических (циркуляция вод, стратификация), биологических (продуктивность экосистем) и геохимических (цикл углерода и биогенов, асидификация) процессов на континентальном шельфе и склоне российской Арктики. Кроме того, изучение переноса и трансформации пресноводного стока в морях российской Арктики имеет ключевое значение для понимания сезонных процессов ледообразования и ледотаяния в масштабе всего Северного Ледовитого океана. На этой основе можно строить прогнозы и оценки последствий глобальных климатических изменений, происходящих в Арктической зоне Российской Федерации под влиянием естественных и антропоген-

ных факторов. А это важно в том числе и с точки зрения освоения Северного Морского пути.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема 0128-2021-0001) и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных — кандидатов наук в рамках проекта МК-98.2020.5.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dittmar T., Kattner G. The biogeochemistry of the river and shelf ecosystem of the Arctic Ocean: a review / The 7th International Estuarine Biogeochemistry Symposium // Marine Chemistry. 2003. V. 83. № 3. P. 103–120.
2. Boyer E.W., Howarth R.W., Galloway J.N. et al. Riverine nitrogen export from the continents to the coasts // Global Biogeochem. Cycles. 2006. V. 20. GB1S91.
3. Milliman J.D., Farnsworth K.L. River discharge to the coastal ocean: A global synthesis. Cambridge University Press, 2013.
4. Bhatia M., Kujawinski E., Das S. et al. Greenland meltwater as a significant and potentially bioavailable source of iron to the ocean // Nature Geosci. 2013. V. 6. P. 274–278.

5. *Lebreton L., van der Zwet J., Damsteeg J.W. et al.* River plastic emissions to the world's oceans // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. 15611.
6. *Осадчиев А.А., Барымова А.А., Седakov П.О. и др.* Гидрофизическая структура и динамика течения плюма реки Кодор // *Океанология.* 2021. № 1. С. 5–20.
7. *Emmett R.L., Krutzikowsky G.K., Bentley P.* Abundance and distribution of pelagic piscivorous fishes in the Columbia River plume during spring/early summer 1998–2003: Relationship to oceanographic conditions, forage fishes, and juvenile salmonids // *Progr. Oceanogr.* 2006. V. 68. № 1. P. 1–26.
8. *Zhou M., Shen Z., Yu R.* Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River: Coastal ecosystem responses to Changing nutrient inputs from large temperate and subtropical rivers // *Continent. Shelf Res.* 2008. V. 28. № 12. P. 1483–1489.
9. *Huang, W.-J., Cai W.-J., Wang Y. et al.* The carbon dioxide system on the Mississippi River-dominated continental shelf in the northern Gulf of Mexico: 1. Distribution and air-sea CO<sub>2</sub> flux // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2015. V. 120. P. 1429–1445.
10. *Horner-Devine A.R., Hetland R.D., MacDonald D.G.* Mixing and transport in coastal river plumes // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2015. V. 47. № 1. P. 569–594.
11. *Осадчиев А.А.* Распространение плюма реки Амур в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе // *Океанология.* 2017. № 3. С. 417–424.
12. *Korshenko E., Zhurbas V., Osadchiv A. et al.* Fate of river-borne floating litter during the flooding event in the northeastern part of the Black Sea in October 2018 // *Mar. Poll. Bull.* 2020. V. 160. 111678.
13. *Osadchiv A.A., Barymova A.A., Sedakov R.O. et al.* Spatial structure, short-temporal variability, and dynamical features of small river plumes as observed by aerial drones: Case study of the Kodor and Bzyp river plumes // *Remote Sensing.* 2020. V. 12. 3079.
14. *Ярмолюк В.В., Коваленко В.И.* Глубинная геодинамика, мантийные плюмы и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // *Петрология.* 2003. № 6. С. 556–586.
15. *Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П.* Геофизические, магматические и металлогенические признаки проявления мантийного плюма в верховьях рек Алдан и Амур // *Геология и Геофизика.* 2014. № 4. С. 568–593.
16. *Лукашин В.Н., Алейник Д.Л., Исаева А.Б. и др.* О геохимии плюма нейтральной плавучести над гидротермальным полем Рэйнбоу и потоках осадочного материала из него // *Геохимия.* 2004. № 5. С. 488–502.
17. *Русаков В.Ю.* Геохимические особенности гидротермальных плюмов над полями Таг и Брокен Спур (Срединно-Атлантический хребет) // *Геохимия.* 2009. № 2. С. 115–140.
18. *Полудницин А.Н., Шарифуллин А.Н.* Динамика спирального конвективного плюма в жидкости с большим числом Прандтля // *Известия РАН. Механика жидкости и газа.* 2013. № 6. С. 29–32.
19. *Черногор Л.Ф.* Магнито-ионосферные эффекты метеороидного плюма // *Геомагнетизм и Аэронаука.* 2018. № 1. С. 125–132.
20. *Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др.* Поверхностный опреснённый слой в Карском море // *Океанология.* 2010. № 5. С. 698–708.
21. *Журбас В.Н., Завьялов П.О., Свиридов А.С. и др.* О переносе стока малых рек вдольбереговым бароклинным морским течением // *Океанология.* 2011. Т. 51. № 3. С. 440–449.
22. *Короткина О.А., Завьялов П.О., Осадчиев А.А.* Субмезомасштабная изменчивость полей течения и ветра в прибрежной акватории Сочи // *Океанология.* 2011. № 5. С. 797–806.
23. *Dai A., Trenberth K.E.* Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations // *J. Hydrometeorol.* 2002. V. 3. P. 660–687.
24. *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. P. 617–637.
25. *Carmack E.C., Yamamoto-Kawai M., Haine T.W.N. et al.* Freshwater and its role in the Arctic Marine System: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans // *J. Geophys. Res. Biogeosciences.* 2016. V. 121. № 3. P. 675–717.
26. *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. C00A05
27. *McLaughlin F.A., Carmack E.C.* Nutricline deepening in the Canada Basin, 2003–2009 // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L24602.
28. *Pogojeva M., Zhdanov I., Berezina A. et al.* Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic Seas // *Mar. Poll. Bull.* 2021. V. 166. 112201.
29. *Yakushev E., Gebruk A., Osadchiv A. et al.* Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // *Comm. Earth Environ.* 2021. V. 2. 23.
30. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология.* 1994. № 5. С. 735–747.
31. *Carmack E., Wassmann P.* Food webs and physical-biological coupling on pan-Arctic shelves: unifying concepts and comprehensive perspectives // *Progr. Oceanogr.* 2006. V. 71. Is. 2–4. P. 446–477.
32. *Semiletov I., Pipko I., Gustaffson O. et al.* Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nat. Geosci.* 2016. V. 9. P. 361–365.
33. *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.
34. *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 Sci.* 2020. V. 16. P. 1–18.
35. *Osadchiv 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. 844.
36. *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. P. 5916–5935.
37. *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.
38. *Спивак Э.А., Осадчиев А.А., Семилетов И.П.* Структура и изменчивость плюма реки Лена в юго-восточной части моря Лаптевых // *Океанология.* 2021. № 6. С. 887–889.
39. *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.
40. *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. № 1. e2020JC016486.
41. *Osadchiev A.A., Frey D.I., Spivak E.A. et al.* Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2021. in press.
42. *Morison J., Kwok R., Peralta-Ferriz C. et al.* Changing Arctic Ocean freshwater pathways // *Nature.* 2012. V. 481. P. 66–70.
43. *Carmack E., Winsor P., Williams W.* The contiguous panarctic Riverine Coastal Domain: A unifying concept. Overarching perspectives of contemporary and future ecosystems in the Arctic Ocean // *Progr. Oceanogr.* 2015. V. 139. P. 13–23.
44. *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.
45. *Janout M.A., Aksenov Y., Holemman J.A. et al.* Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing, and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2015. V. 120. P. 4925–4944.