

# Структура плюма Оби - Енисея в Карском море незадолго до образования осеннего льда

А.А. Осадчиев<sup>1,2\*</sup>, З.В. Забудкина<sup>2</sup>, В.С. Рогожин<sup>1,3</sup>, Д.И. Фрей<sup>1,4</sup>, А.С. Гордей<sup>1</sup>,  
Э.Я. Спивак<sup>5</sup>, А.Н. Салюк<sup>5</sup>, И.П. Семилетов<sup>5</sup> и Р.О. Седаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Российская Федерация, г. Москва; <sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Российская Федерация, г. Долгопрудный, <sup>3</sup>Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, г. Москва; <sup>4</sup>Морской гидрофизический институт Российской академии наук, Российская Федерация, г. Севастополь; <sup>5</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ДВО РАН), Российская Федерация, г. Владивосток

Главные сибирские реки образуют крупные речные плюмы в Северном Ледовитом океане, которые определяют структуру поверхностного морского слоя на арктическом шельфе. Такие речные плюмы были подробно изучены в условиях теплого периода года (лета и ранней осени). Они характеризуются высокой интенсивностью речного стока и отсутствием льда. В настоящем исследовании представлены данные измерений *in situ*, выполненных в Карском море в конце октября 2020, 2021 и 2022 гг. Было выявлено, что в плюме Оби - Енисея возникает интенсивная конвекция в результате теплопотери поверхностного слоя, обусловленной переносом холодного воздуха с суши в центральную часть Карского моря. Данный процесс вызывает гомогенизацию плюма Оби - Енисея и приводит к чрезвычайно резкому скачку солёности (до 10 - 12 на вертикальном отрезке, составляющим 1 - 2 м.) **в области** между плюмом и нижележащими морскими водами. Этот резкий градиент формируется не на всей площади плюма, исключая, во-первых, Обскую губу и Енисейский залив по причине низкой солёности поверхностных вод и, соответственно, высоких температур максимальной плотности и, во-вторых, область боковой границы плюма вследствие интенсивного горизонтального перемешивания через границу между плюмом и морем. В результате осенняя конвекция существенно изменяет вертикальную структуру плюма Оби - Енисея, что может повлиять на его дальнейшее распространение под морским льдом в зимний период.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Речной плюм, осенняя конвекция, стратификация, поверхностный слой, Обь, Енисей, Карское море, Северный Ледовитый океан

## 1 Введение

В Карское море поступает обильный речной сток (в объеме 1350 - 1500 км.<sup>3</sup> (в основном, из рек Обь и Енисей), который составляет одну четвертую часть суммарного речного стока в Северный Ледовитый океан (Гордеев и др., 1996). Это приводит к формированию плюма Оби - Енисея площадью 200 000 - 250 000 км.<sup>2</sup> в период отсутствия льда, который является одним из крупнейших речных плюмов в Мировом океане (Фрей и Осадчиев, 2021; Осадчиев, 2021; Осадчиев и др., 2021a). За последние два десятилетия было выполнено множество океанографических исследований в Карском море в теплое время года (Pavlov and Pfirman, 1995; Johnson et al., 1997; McClimans et al., 2000; Морозов и др., 2008; Зацепин и др., 2010, Зацепин и др., 2015; Завьялов и др., 2015; Зацепин и др., 2017; Осадчиев и др., 2017; Осадчиев и др., 2019; Осадчиев и др., 2020a; Осадчиев и др., 2020b; Осадчиев и др., 2021b), которые дают общее представление о структуре и динамике плюма Обь-Енисей в период с июля по сентябрь. Обобщенные выводы по данному

вопросу приведены в работе А.А. Осадчиева (Осадчиев и др., 2021a). Первоначальное формирование плюма Оби и Енисея происходит в июне - июле в период опреснения рек Обь и Енисей (общий объем стока – 100 000 - 150 000 м<sup>3</sup>/с). Соленость в пределах плюма составляет 5 - 15, с резким вертикальным градиентом солености (3 - 5 ПЕС/м.) на границе между плюмом и морем. Далее (в августе и сентябре) наблюдается неуклонное расширение плюма, соленость на его поверхности увеличивается с 5 - 15 до 15 - 25, а вертикальная стратификация на границе плюм-море ослабевает до 1 - 2 ПЕС/м. (Осадчиев и др., 2021a). Граница между плюмом Оби и Енисея и окружающей соленой морской водой определяется как область максимального градиента солености по вертикали и горизонтали. Обычно данный градиент располагается на изохалинах ~20-30, однако он может быть может иметь большую или меньшую степень выраженности (Осадчиев и др., 2021a).

В холодное время года (с октября по июнь, когда температура воздуха < 0°C) океанографические измерения в Карском море проводятся в небольшом количестве в связи со сложными погодными и ледовыми условиями. По этой причине имеется недостаточно сведений о структуре и динамике плюма Оби - Енисея в период с октября по июнь. В то же время условия внешней среды в холодное время года значительно отличаются от условий, существующих в течение лета и ранней осени, в связи с: (1) уменьшением объема речного стока (10 000 - 20 000 м<sup>3</sup>/с); (2) низкой температурой воздуха; (3) наличием ледяного покрова. Немногочисленные измерения, сделанные в Карском море в ледовых условиях, показали, что соленость на поверхности моря повышается до 30 - 32, а низкая соленость сохраняется только в области Обской губы и Енисейского залива (Федулов и др., 2018; Мошаров и др., 2018). Однако на данный момент ничего не известно о **состоянии** плюма Оби - Енисея в холодное время года, в частности, о его трансформации поздней осенью, которая предшествует диссипации и/или адвекции плюма в Карском море к концу зимы.

Настоящее исследование описывает измерения *in situ*, выполненные в Карском море в конце октября в 2020, 2021 и 2022 годах. Данные таких измерений определяют структуру плюма Оби - Енисея незадолго до образования льда. В работе рассматриваются процессы, которые формируют вертикальную структуру плюма поздней осенью и его динамику, обусловленную **силой плавучести**, в Карском море в условиях ледового покрова. Ниже приведена структура данной статьи. Раздел 2 содержит, во-первых, **общие результаты** исследований *in situ* (включая спутниковые данные о состоянии ледового покрова на море и данные реанализа ветрового режима, которые рассматриваются в настоящей работе), и, во-вторых, численную модель конвекции в плюме. Подробный анализ измерений *in situ* и описание структуры плюма Оби - Енисея в конце октября представлены в разделе 3. Раздел 4 посвящен вопросам конвекции в плюме Оби - Енисея и ее зависимости от внешних условий воздействия, а в разделе 5 приведены соответствующие выводы.

## 2 Данные и методы

### 2.1 Используемые данные

Гидрографические данные *in situ* для изучения плюма Оби - Енисея были собраны в ходе четырех океанографических съемок, произведенных в Карском море научно-исследовательскими судами «Академик Мстислав Келдыш», «Профессор Логачев» и «Алексей Марышев». Все экспедиции осуществлялись в начале холодного периода года (в конце октября), т.е. 25 - 26 октября 2020 года, 13 - 28 октября 2021 года и 19 - 20 октября 2022 года, незадолго до образования льда в области измерений (за 1 - 7 дней). Измерения

вертикальной термохалинной структуры были выполнены с помощью приборов CTD (SBE 911 plus, SBE 19 plus и RBR concertino) с пространственным разрешением 0,2 м. Измерения *in situ* в области между Обской губой и Енисейским заливом (поперечные **трансекты** T1 и T2, зеленые шестиугольники и черные звездочки на Рис. 1) были проведены в октябре 2020 и 2021 гг. Измерения *in situ* на всей центральной и северной части Обь-Енисейского плюма Оби - Енисея (меридиональная трансекта T3, красные кружки на Рис. 1) осуществлялись в октябре 2021 года, а в восточной части плюма Оби - Енисея (трансекты T4 и T5, синие треугольники и коричневые квадраты на Рис. 1) - в октябре 2021 и 2022 гг. Кроме того, настоящая работа включает анализ вертикальных термохалинных измерений *in situ*, выполненных на выбранных станциях Обь-Енисейского плюма во время океанографических экспедиций в период сентября и августа 2021 года, и описанных в соответствующих работах (Осадчиев и др., 2021а; Осадчиев и др., 2022а). Исследование ветрового воздействия проводилось путем атмосферного реанализа ERA5 при пространственном и почасовом временном разрешении 0,25° (Hersbach et al., 2020). Данные для реанализа ERA5 были загружены с сайта Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) (<https://www.ecmwf.int/en/forecast/data-sets/era5>).

## 2.2 Численная модель

В рамках данного исследования была разработана простая одномерная модель для изучения конвекции в Карском море, вызванной резким снижением температуры воздуха поздней осенью. **Интенсивность** конвекции определяется теплопотерей с поверхности моря. Это приводит к повышению плотности верхнего слоя морской воды и последующему перемешиванию слоев, которое интенсивно гомогенизирует смешанный слой и увеличивает его глубину (Marshall and Schott, 1999). В используемой одномерной модели конвекции вертикальная водная толща представлена как набор слоев с постоянным размером по вертикали и переменным уровнем температуры и солености. На каждом этапе моделирования в верхнем слое происходит теплопотеря в результате его взаимодействия с холодным воздухом. Температура такого слоя будет уменьшаться одновременно с увеличением его плотности. Данный процесс развивается сверху вниз за счет теплообмена в толще воды. Теплообмен в толще воды определяется по приведенному ниже уравнению.

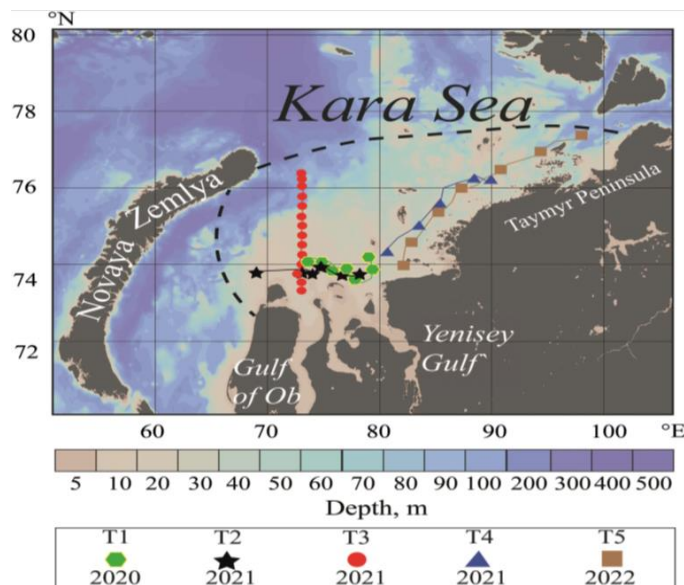
$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{с граничными условиями:}$$

$$-\rho_0 c_p K_t \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = Q, \rho_0 c_p K_t \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0,$$

где  $T$  - температура воды,  $K_t$  - турбулентная теплопроводность,  $\rho_0$  - плотность водного слоя,  $c_p$  - удельная теплоемкость воды,  $Q$  - тепловой поток через водную поверхность,  $H$  - глубина моря (Wells et al., 2009; Landau and Lifshitz, 2013). Заданная турбулентная теплопроводность ( $K_t$ ) составляла 10<sup>-5</sup> м<sup>2</sup> (Schmitt and Olson, 1985). Для численного решения данного уравнения теплопроводности применяется неявная схема **расчета** и метод развертки. Изменение температуры верхнего слоя вследствие теплообмена с атмосферой описывается уравнением  $Q = c_a \rho_a c_n V (T_a - T_s)$ , где  $c_a$  - удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении,  $\rho_a$  - плотность воздуха,  $c_n$  - число Стэнтона,  $V$  - скорость ветра,  $T_a$  и  $T_s$  - соответственно температура воздуха и морской поверхности (Smith, 1989; Brickman, 1995).

Охлаждение приводит к повышению плотности верхних слоев (рассчитанной по уравнению состояния EOS-80), и они распространяются до глубины слоев с аналогичным уровнем плотности. Этот процесс воспроизводится путем сортировки вертикальных слоев

для создания структуры, в которой плотность будет устойчиво возрастать в направлении от поверхности к морскому дну. Предполагается, что охлаждение поверхностного слоя происходит гораздо медленнее, чем развитие вертикальной конвекции и перемешивание в толще воды (Marshall and Schott, 1999). Таким образом, на каждом шаге модели полученная глубина вертикальной конвекции усредняется по температуре и солености для воспроизведения гомогенизации смешанного поверхностного слоя. Кроме того, данная модель воспроизводит турбулентное перемешивание на границе между конвективной и неконвективной частями водной толщи, вызванное резким замедлением вертикального конвекционного потока (Marshall and Schott, 1999; Canuto et al., 2004). Для этой цели в случаях, когда конвективная зона распространяется до уровня ниже смешанного слоя, такой слой продлевается на 0,2 м. в глубину.



Карское море  
Новая Земля      Обская губа      Енисейский залив      Полуостров Таймыр  
Глубина (м.)

### РИСУНОК 1

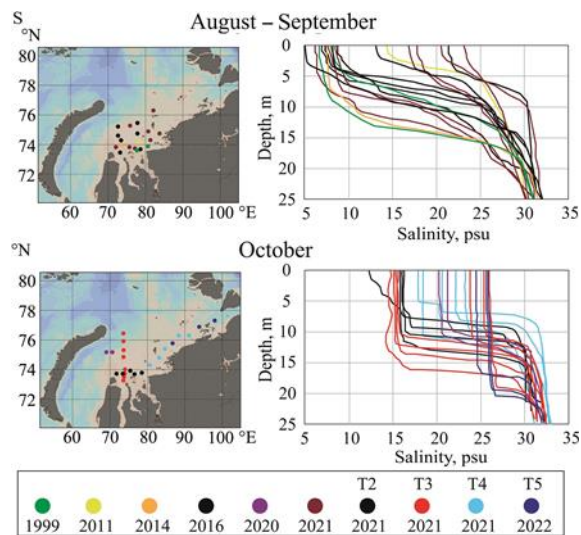
Карта района исследования в Карском море и местонахождения гидрологических станций по состоянию на 25 - 26 октября 2020 г. (зеленые шестиугольники, трансекта T1), 24 - 28 октября 2021 г. (черные звездочки, трансекта T2), 21 - 26 октября 2021 г. (красные кружки, трансекта T3), 13 - 15 октября 2021 г. (голубые треугольники, трансекта T4), 19 - 20 октября 2022 г. (коричневые квадраты, трансекта T5). Черная пунктирная линия обозначает границу плюма Оби - Енисея в период полевых исследований.

Пространственный шаг расчетной сетки, т.е. фиксированный вертикальный размер морских слоев, составил 0,5 см. в соответствии с характеристическим размером теплового пограничного слоя водной поверхности (Wells et al., 2009). Уменьшение этого размера приводит к ослаблению теплового потока на определенном модельном шаге, в результате чего глубина проникновения конвекции будет меньше, чем соответствующая глубина, зарегистрированная при измерениях *in situ*. Заданный временной шаг модели равен 6 часам (Schmitt and Olson, 1985). Сокращение указанного временного шага приводит к уменьшению как теплового потока, так и глубины проникновения конвекции. В данной модели не воспроизводится диффузия соли, так как она происходит намного медленнее, чем солевой обмен при турбулентном перемешивании во время конвекции.

### 3 Результаты

Основная мотивация для проведения настоящего исследования связана с существенными различиями в вертикальной структуре солености в центральной части Карского моря, куда поступает плюм Оби - Енисея, в период с августа - сентября по конец октября (Рис. 2). Измерения *in situ*, выполненные в разные годы в районе исследований в августе - сентябре, убедительно демонстрируют, что соленость стабильно повышается от поверхности воды ко дну, с максимальным градиентом солености на глубинах 5 - 15 м., возникающим на вертикальной границе между плюмом Оби - Енисея и нижележащими солеными морскими водами (Рис. 2А). Данная структура претерпевает значительные изменения к концу октября, что проявляется в гомогенизации поверхностного слоя речного плюма и формировании чрезвычайно резкого градиента солености на границе между плюмом и морем (Рис. 2В). Вертикальная структура плюма Оби - Енисея была подробно описана в одной из наших последних работ (Осадчиев и др., 2021а), а настоящее исследование посвящено процессам, происходящим в плюме в конце октября незадолго до образования льда.

Измерения в центральной части плюма Оби - Енисея в районе Обской губы и Енисейского залива проводились по трансекте Т1 в октябре 2020 года (Рис. 3) и по трансекте Т2 в октябре 2021 года (Рис. 4). В обоих случаях соленость плюма Оби - Енисея составила 14 - 18, а соленость воды ниже уровня плюма – 28 - 32 (Рис. 3А, 4А). Глубина плюма по линии обеих трансект достигала 10 - 15 м. Значения вертикальных градиентов солености на границе между плюмом и морем были очень высокими, а именно 1 - 5 ПЕС/м. в октябре 2020 года и 4 - 8 ПЕС/м. в октябре 2021 года (Рис. 3С, 4С). В частности, расстояние по вертикали между изохалинами 20 и 28 не превышало 1 - 2 м. по данным всех гидрологических станций на трансекте Т3 (Рис. 4А). Вертикальные градиенты солености в пределах плюма были, наоборот, очень низкими и не превышали 0,5 ПЕС/м. (Рис. 3С, 4С). В силу низких температур воздуха в конце октября 2020 года (-2,5 - -2°C) и особенно в конце октября 2021 года (-6,5 - -5°C), а также интенсивного охлаждения морской поверхности по этой причине, значения ее температуры составили -0,5 - 0°C в октябре 2020 года и -1 - -0,5°C в октябре 2021 года (Рис. 3В, 4В). Температура на глубине ниже плюма Оби - Енисея также была низкой (-1 - -0,5°C) в течение обоих лет, в то время как гораздо более высокие значения (0,5 - 1,5°C) были зафиксированы на границе между плюмом и морем, где наблюдались максимальные величины градиентов солености (Рис. 3В, 4В). Следует отметить, что в 2020 и 2021 годах измерения выполнялись практически в одни и те же даты, поэтому, по нашему мнению, выявленные различия в вертикальной термохалинной структуре плюма Оби - Енисея связаны с разными атмосферными условиями в указанные годы. Данные различия не были обусловлены междугодовой изменчивостью стока рек Оби и Енисея, объем которого в рассматриваемые годы был относительно небольшим. В частности, суммарный объем стока рек Оби и Енисея в 2020, 2021 и 2022 годах составил 1090, 1162 и 1067 км.<sup>3</sup> соответственно.

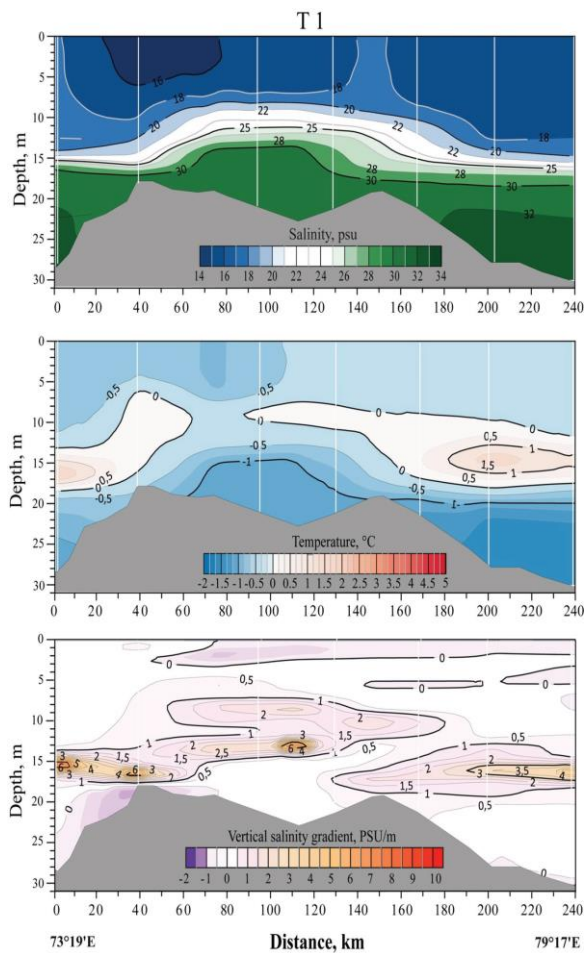


Август - сентябрь  
Соленость (ПЕС)

Октябрь

**РИСУНОК 2**

Типичная вертикальная структура солености в плюме Оби - Енисея в августе - сентябре (А) и в октябре (В)



Глубина (м.)

Расстояние (км.)

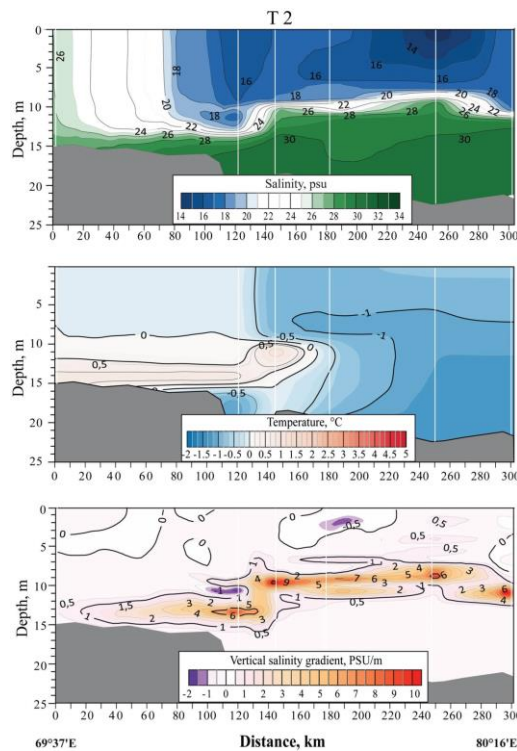
Соленость (ПЕС)

Температура (°C)

Вертикальный градиент солености (ПЕС/м.)

**РИСУНОК 3**

Вертикальное распределение солености (А), температуры (В) и вертикальный градиент солености (С) по трансекте Т1 по состоянию на 25 - 26 октября 2020 г.



Глубина (м.)      Расстояние (км.)  
 Соленость (ПЕС)      Температура (°С)      Вертикальный градиент солёности (ПЕС/м.)

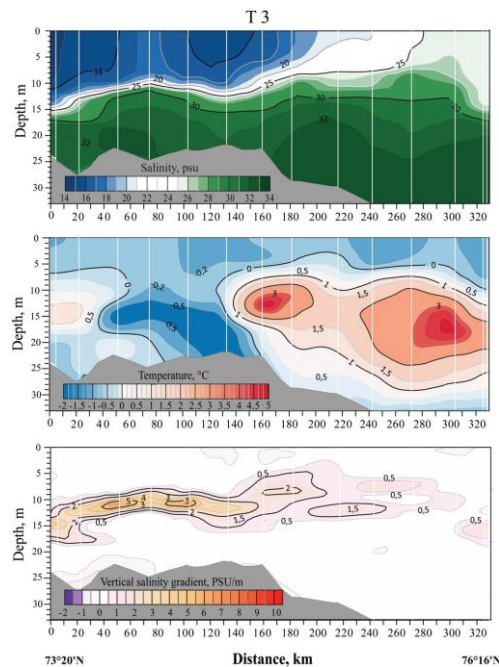
#### РИСУНОК 4

Вертикальное распределение солёности (А), температуры (В) и вертикальный градиент солёности (С) по трансекте Т2 по состоянию на 24 - 28 октября 2021 г.

В северной части плюма Оби - Енисея измерения проводились по трансекте Т3 в октябре 2021 года (Рис. 5). **Уровень** солёности на поверхности моря по трансекте Т3 увеличился с 15 - 18 у Обской губы до 20 - 25 в северной части плюма, в то время как на глубине ниже плюма он составил 30-32 (Рис. 5А). На нижней границе плюма наблюдался резкий вертикальный градиент солёности (3 - 5 ПЕС/м.) в южной и центральной части трансекты Т3. Расстояние между изохалинами 20 и 30 по вертикали составляло 2 - 3 м. (Рис. 5С). В северной части трансекты вертикальный градиент снизился до 0,5 - 1 ПЕС/м., а указанное расстояние увеличилось до 8 - 10 м. Глубина плюма в нижней и центральной части трансекты Т3 составила 9 - 13 м. Вертикальные градиенты солёности в пределах плюма не превышали 0,5 ПЕС/м. (Рис. 5С). Температура поверхностного слоя была равна -0,2 - 0°С (Рисунок 5В). Высокие значения температуры были зафиксированы на глубине ниже уровня плюма в северной глубокой части трансекты (до 2 - 4°С) и вблизи Обской губы (0,5 - 1°С), в то время как в центральной части разреза температура составила -0,5 - -0,2°С (Рис. 5В).

Измерения *in situ* показывают, что на границе между плюмом и морем в центральной и северной части плюма, т.е. по линии трансект Т1, Т2 и Т3 (Рис. 3С, 4С, 5С), наблюдается максимальная температура. Это объясняется изложенными ниже причинами. На протяжении большей части периода отсутствия льда воды плюма Оби - Енисея значительно теплее окружающей солёной морской воды, поскольку водосборные бассейны Оби и Енисея пролегают на несколько тысяч километров к югу от Карского моря. В июле этот контраст наиболее заметен: температура в плюме Оби - Енисея составляет > 10°С, а в нижележащих слоях морской воды - < 0°С (Осадчиев и др., 2021а). В августе и сентябре наблюдается устойчивое снижение температуры до 2 - 4°С в плюме Оби - Енисея за счет охлаждения водной поверхности и ее повышение до 0 - 1°С в

нижележащих водах на глубине до 20 - 25 м. за счет теплообмена на вертикальной границе между плюмом и морем. Интенсивное охлаждение воздуха и моря в октябре приводит к формированию температурного максимума на границе между плюмом и морем. Позднее, в ноябре, температура опускается ниже максимальных значений в связи с продолжающимся теплообменом. Придонные воды шельфовых областей в этом регионе (на глубине ниже 25-30 м.) остаются холодными ( $< 0^{\circ}\text{C}$ ) в течение всего года.



Соленость (ПЕС)      Температура ( $^{\circ}\text{C}$ )      Вертикальный градиент солености (ПЕС/м.)  
Глубина (м.)      Расстояние (км.)

### РИСУНОК 5

Вертикальное распределение солености (А), температуры (В) и вертикальный градиент солености (С) по трансекте Т3 по состоянию на 21 - 24 октября 2021 г.

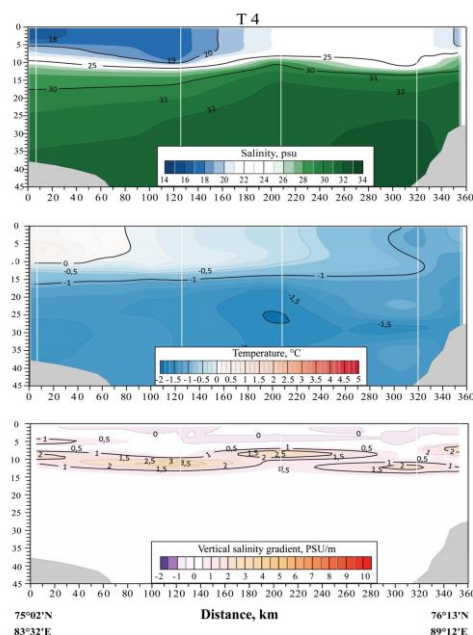
В восточной части плюма Оби - Енисея измерения проводились по трансекте Т4 в октябре 2020 года (Рис. 6) и трансекте Т5 в октябре 2021 г. (Рис. 7). Уровень солености на поверхности моря по обоим трансектам увеличился с 18 - 20 в области Енисейского залива до 25 - 27 в восточной части плюма, в то время как на глубине ниже плюма он составил 30 - 32 (Рис. 6А, 7А), что, в целом, аналогично показателям в области трансекты Т4 (1 - 3 ПЕС/м.). Однако вертикальный градиент солености на границе плюма и моря по трансекте Т5 (0,5 - 1 ПЕС/м.) был намного ниже, чем по трансектам Т1 - Т3. Как и в случае с трансектами Т1 - Т3, вертикальные градиенты солености в плюме не превышали 0,5 ПЕС/м. (рис. 6С, 7С). Глубина плюма по трансекте Т4 составила 10 - 15 м., а по трансекте Т5 - 15 - 20 м. Т5. Наблюдалось снижение температуры на поверхности моря с запада на восток - от 0 до  $-1^{\circ}$  по трансекте Т4 (Рис. 6В) и от 1 до  $0^{\circ}\text{C}$  по трансекте Т5 (Рис. 7В) по причине охлаждения воздуха в конце октября 2021 года ( $-6,5$  -  $-5^{\circ}\text{C}$ ) по сравнению с концом октября 2022 года ( $-4$  -  $-2,5^{\circ}\text{C}$ ). Температура на глубине ниже плюма составила  $< -1^{\circ}\text{C}$  по трансекте Т4 (Рис. 6В) и  $< -0,5^{\circ}\text{C}$  по трансекте Т5 (Рис. 7В). Температура в восточной части плюма в области трансект Т4 и Т5 (Рис. 6С, 7С) не достигала максимума. Предположительно это объясняется тем, что начальная разность температур плюма и нижележащих морских вод была значительно меньше по причине удаленности плюма от Обской губы и Енисейского заливов. Таким образом, в данной части плюма не формируется четко выраженный температурный максимум.



## 4 Обсуждение

Измерения *in situ*, выполненные в Карском море в конце октября, выявили существенные различия в вертикальной термохалинной структуре плюма Оби - Енисея по сравнению с его состоянием в августе и сентябре (Рис. 2). Наиболее заметной особенностью плюма Оби - Енисея, которая регулярно наблюдается в конце октября, является чрезвычайно узкая и резкая зона вертикального градиента между плюмом и нижележащими солеными морскими водами. Например, на определенных участках границы между плюмом и морем уровень солености повысился с 16 - 18 до 28 - 30 в пределах расстояния 1 - 2 м. по вертикали (черные линии на Рис. 8). Это один из крупнейших вертикальных градиентов солености, зафиксированных в Мировом океане.

Ранее подобные резко выраженные градиенты солености были зарегистрированы в речных плюмах, образованных небольшими реками при отсутствии сильных внешних воздействий (ветров, приливов, береговых течений) (McPherson et al., 2020; Осадчиев и др., 2020d; Осадчиев и др., 2022b). В то же время, насколько известно, они никогда не наблюдались в плюмах больших рек. Следует отметить, что резкие градиенты солености в малых речных плюмах формируются вблизи источников пресной воды в речных устьях в результате первичного фронтогенеза. Данные градиенты проявляются во время краткого (в пределах нескольких часов) пребывания речной воды в плюмах и впоследствии уменьшаются из-за перемешивания вод на границе между плюмом и морем. Диссипация опресненной воды в результате смешивания небольшого плюма с окружающим соленым морем оказывает ограниченное воздействие на море и не приводит к накоплению пресной воды в прилегающей морской акватории. Как следствие, **состав** соленой морской воды в области речного устья под небольшим плюмом остается практически неизменным. Это второй важный фактор формирования резких градиентов солености в результате первичного фронтогенеза в малых плюмах, который не распространяется на крупные плюмы, поскольку их смешивание с соленой морской водой значительно снижает соленость окружающего моря. Таким образом, первичный фронтогенез в крупных плюмах вблизи речных устьев не способствует формированию резких градиентов солености.



Соленость (ПЕС)    Температура (°С)    Вертикальный градиент солености (ПЕС/м.)  
 Расстояние (км.)

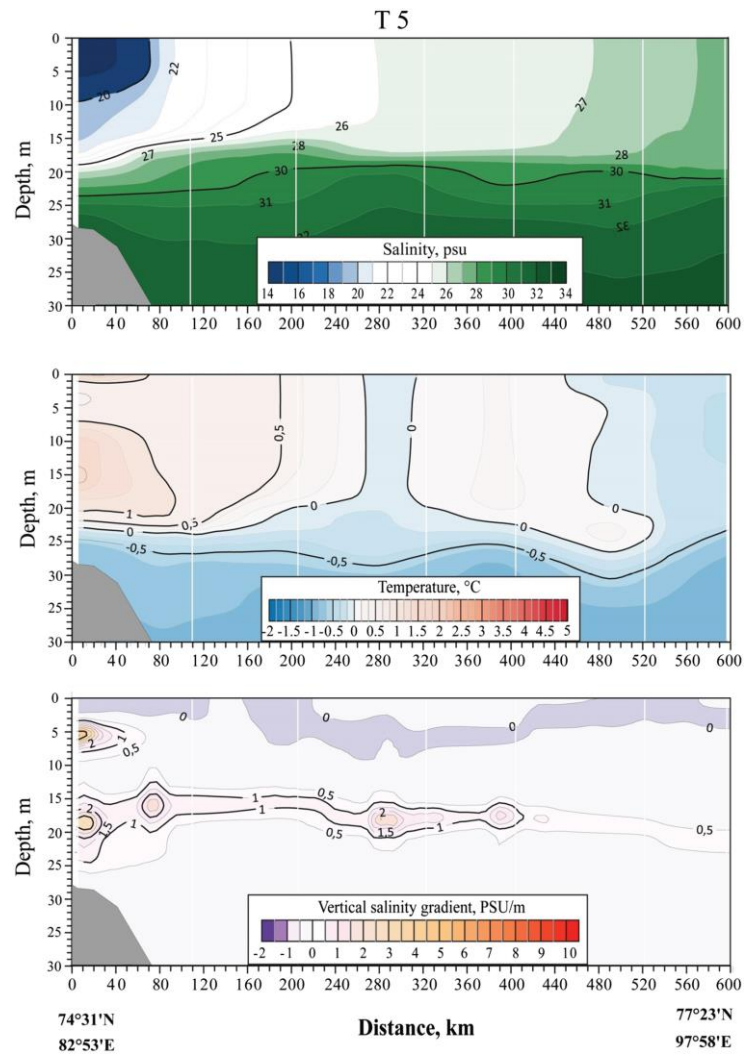
### РИСУНОК 6

Вертикальное распределение солености (А), температуры (В) и вертикальный градиент солености (С) по трансекте Т4 по состоянию на 13 - 15 октября 2021 г.

Резкие градиенты солености наблюдаются в плюме Оби - Енисея на обширных участках, удаленных от устьев рек, и **характеризуются** длительным временем пребывания речной воды в плюме (порядка нескольких недель или месяцев), поэтому они не связаны с первичным фронтогенезом. Кроме того, такие градиенты не зафиксированы в сентябре и начале октября (Осадчиев и др., 2021a), следовательно, они формируются в течение нескольких недель или меньшего срока. Предполагается, что градиенты образуются в результате процесса конвекции, обусловленного охлаждением поверхностного слоя и его перемешиванием **с другими водными слоями** в начале холодного периода в Карском море. Данный процесс вызывает вертикальное перемешивание в плюме, увеличивает его глубину и гомогенизирует соленость. Граница между плумом и морем сливается со слоем перемешивания и постоянно размывается. С другой стороны, конвекция не проникает до глубины ниже границы между плумом и морем из-за высокой солености и плотности нижележащих морских вод. Это приводит к образованию чрезвычайно узкой и резкой зоны вертикального градиента между плумом и нижележащими соленым морем. Описанный вторичный фронтогенез, связанный с осенней конвекцией, наблюдается на большей части площади плюма Оби - Енисея.

Для того, чтобы доказать предположение о формировании резких градиентов солености в плюме Оби - Енисея, была разработана одномерная численная модель, имитирующая конвекцию в Карском море в период с середины августа по конец октября (Рис. 9, 10). Одномерные модели широко использовались в предыдущих исследованиях (Schmitt and Olson, 1985; Marshall and Schott, 1999; Canuto et al., 2004) для изучения конвекции в различных частях Мирового океана. Как и в случае с оговоренными исследованиями в открытом море, одномерная модель может применяться для достоверного воспроизведения конвекции в плюме Оби - Енисея по перечисленным ниже причинам. Во-первых, плум Оби - Енисея занимает большую площадь, поэтому его термохалинная структура относительно однородна в горизонтальном направлении (Осадчиев и др., 2021a). Она не является полностью однородной, в частности, соленость повышается по мере продвижения от устьев рек к внешней части плюма. Тем не менее, значительные горизонтальные градиенты солености наблюдаются только на **боковой** границе плюма. Во-вторых, площадь и местоположение плюма Оби - Енисея находятся в октябре в стабильном состоянии в связи с уменьшением речного стока. Активное расширение плюма, вызванное паводками на реках Обь и Енисей, заканчивается к сентябрю (Осадчиев и др., 2021a). В-третьих, процесс конвекции, воспроизведенный в модели, вызван охлаждением атмосферы и, следовательно, наблюдается одновременно на всей площади плюма. Активная конвекция происходит очень быстро (за несколько недель), т.е. за меньший временной промежуток, чем период выраженной сезонной изменчивости плюма Оби - Енисея.

Исходная термохалинная структура вертикального водяного столба воды была задана в численной модели в соответствии с измерениями *in situ*, проведенными в плюме Оби - Енисея. **Корректность** полученной вертикальной структуры подтверждалась результатами измерений *in situ*. Температура воздуха (Рис. 11G) и скорость ветра (Рис. 11H) как факторы внешнего воздействия были заданы на основании реанализа атмосферы ERA5. В середине августа центральная часть плюма Оби - Енисея характеризуется температурой 5 - 9°C и соленостью 10 - 15 [Рис. 6-9 в (Осадчиев и др., 2021a)]. На глубине ниже уровня плюма температура снижается до -1 - 1°C на глубинах 20 - 30 м., а соленость увеличивается до 30 - 32. Вертикальная граница между плумом и нижележащими морскими водами составляет 5 - 10 м. в ширину, а вертикальный градиент солености равен 2 - 3 ПЕС/м. Типичное распределение солености и температуры по вертикали в центральной части плюма Оби - Енисея в середине августа показано на Рис. 9 (зеленая сплошная линия).



Соленость (ПЕС)  
Расстояние (км.)

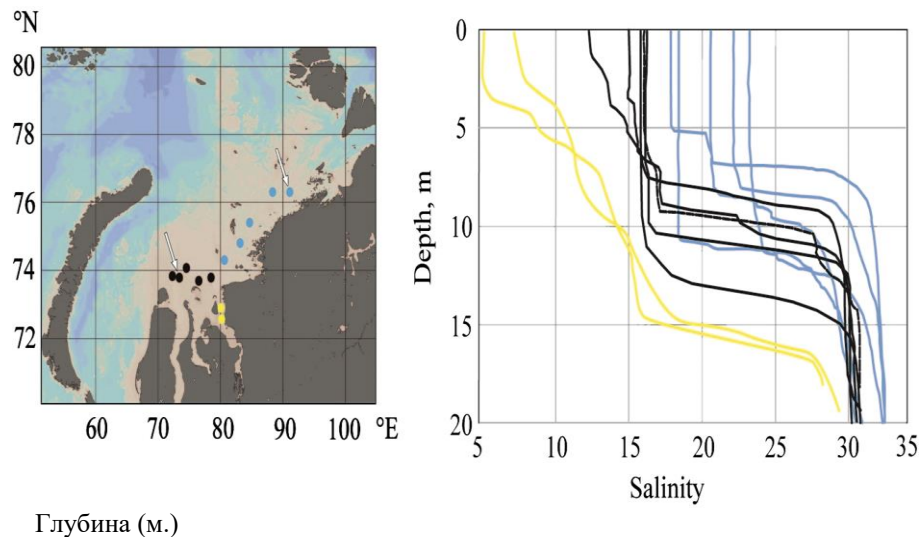
Температура (°C)  
Глубина (м.)

Вертикальный градиент солености (ПЕС/м.)

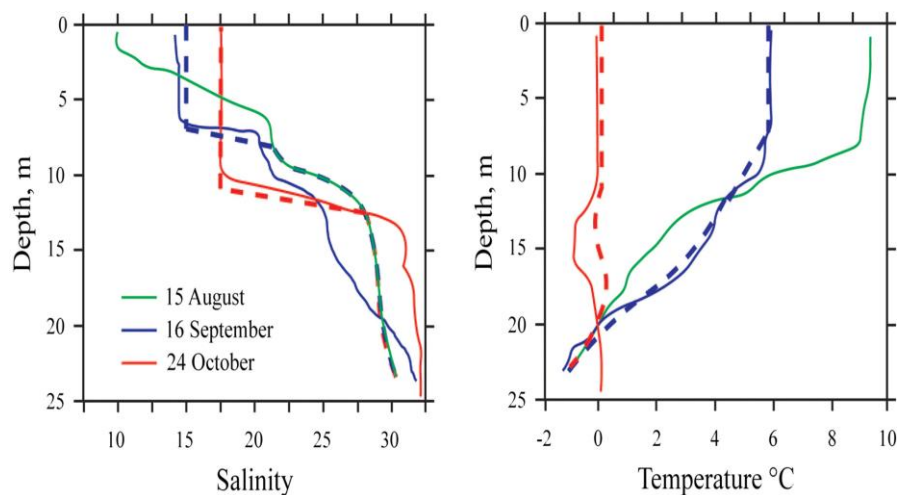
### РИСУНОК 7

Вертикальное распределение солености (А), температуры (В) и вертикальный градиент солености (С) по трансекте Т5 по состоянию на 19 - 20 октября 2022 г.

Охлаждение поверхности плюма Оби - Енисея начинается в сентябре и усиливается в октябре (Рис. 11В) вследствие резкого снижения температуры воздуха (до 2 - 4°C в конце сентября и < 0°C в октябре) (Рис. 11G), который переносится в Карское море с континента. Это приводит к развитию вертикальной конвекции в плюме, характеризующейся увеличением глубины слоя перемешивания (Рис. 11С), уменьшением вертикальной границы между плюмом и морем (Рис. 11D) и повышением поверхностной солености (Рис. 11А). На начальном этапе конвекции глубина слоя перемешивания относительно невелика. Верхний водный слой, характеризующийся малым градиентом солености, быстро сливается с конвективным слоем, глубина которого неуклонно увеличивается под воздействием относительно небольшого охлаждения температуры воздуха и **относительно низкоскоростного ветра**. На узкой нижней границе такого слоя резко повышается соленость и температура (Рис. 11Е, F). Температурный скачок в дальнейшем ослабевает за счет вертикального теплообмена, в то время как скачок солености сохраняется на границе между плюмом и морем. На рисунке 9 представлены результаты измерений *in situ* в плюме (синяя сплошная линия) в середине сентября и численного моделирования (синяя пунктирная линия). К этому времени конвекция стабильно проникала на глубину 7 м., а слой перемешивания охладился до 6°C.

**РИСУНОК 8**

Вертикальные профили солёности в центральной части плума Оби - Енисея (черные кружки и линии), восточной части плума (синие кружки и линии) и Енисейском заливе (желтые кружки и линии) в октябре 2021 г. Белые стрелки обозначают две станции в центральной и восточной частях плума Оби - Енисея, данные которых использовались для подтверждения корректности численной модели (на Рис. 9 и 10).



Глубина (м.)      Солёность      Температура (°C)  
15 августа      16 сентября      24 октября

**РИСУНОК 9**

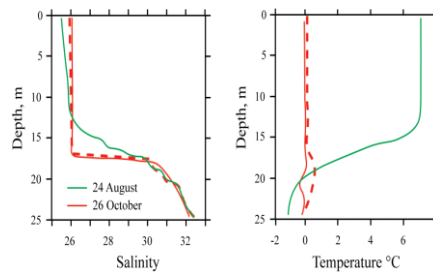
Вертикальная структура солёности (слева) и температуры (справа) в центральной части плума Оби - Енисея в середине августа (зеленая линия), середине сентября (синие линии) и конце октября (красные линии) в соответствии с данными измерений *in situ* (сплошные линии) и численного моделирования (пунктирные линии). Место проведения измерений *in situ* обозначено на рисунке 8 белой стрелкой.

На промежуточном этапе конвекции в конце сентября и в октябре, т.е. после проникновения конвективного слоя на глубину со значительным градиентом солёности (~2 м.), он будет увеличиваться только во время штормовых явлений, сопровождающихся резким охлаждением воздуха. Как правило, конвективный слой увеличивается в глубину при условии, что скорость ветра > 10 - 11 м/с, а разность температур воздуха и моря > 2 - 2,5°C. Однако в некоторых случаях данный процесс происходит при меньшей скорости ветра и большей разности температур воздуха и моря или наоборот, поскольку воздействие **каждого из этих** факторов может быть определяющим. Средняя скорость углубления конвективного слоя в такие периоды составляла 1 м. в сутки (серые полосы на Рис. 11С). В конце октября поверхностная температура снизилась до температуры

максимальной плотности ( $0^{\circ}\text{C}$ ), и дальнейшая конвекция стала невозможной (красные линии на рисунке 9). В результате на последнем этапе конвекции глубина конвективного слоя стабилизируется и увеличивается очень медленно даже во время штормовых явлений. К этому времени глубина смешанного слоя увеличилась до 10 м. (Рис. 11С). Вертикальная фронтальная зона границы между плюмом и морем с умеренным градиентом солености, наблюдавшаяся в августе, в конце октября трансформировалась в узкий (1 - 2 м.) участок (Рис. 11D) с резким градиентом солености (Рис. 11E).

Следует отметить, что данные численной модели (пунктирные линии на Рис. 9, 10) соответствуют результатам измерений *in situ* (сплошные линии на Рис. 9, 10) в части термохалинных характеристик смешанного слоя и границы между плюмом и морем. Термохалинная структура соленых морских вод на глубине ниже границы между плюмом и морем была воспроизведена в модели менее четко. В частности, вертикальная структура солености указанного слоя осталась неизменной относительно значений, заданных в середине августа, поскольку численная модель воспроизводит изменения солености только в той части водной толщи, которая трансформировалась в результате конвекции. Однако на глубине ниже плюма Оби - Енисея наблюдается циркуляция **окружающих вод**, которая может изменить структуру солености. Изменения температуры в области ниже плюма, выявленные путем численного моделирования, связаны с теплообменом в толще воды, который распространяется до глубины ниже уровня скачка солености. Тем не менее, теплообмен не вызывает движения по вертикали и не влияет на соленость, поэтому структура плотности изменяется незначительно. При этом, по нашему мнению, такое расхождение не влияет на корректность результатов настоящего исследования, посвященного изменениям вертикальной структуры плюма Оби - Енисея.

Численные эксперименты показали, что вертикальная конвекция эффективно углубляет слой перемешивания и формирует резкий и узкий градиент солености на его нижней границе в разных частях плюма, что соответствует данным измерений *in situ* (Рис. 8). В то же время скачок солености и глубина образующегося слоя перемешивания сильно зависят от исходных термохалинных условий. В частности, численное моделирование конвекции в более соленой и смешанной восточной части плюма Оби - Енисея показало, что результирующая поверхностная соленость (26) и размер смешанного слоя по вертикали (16-17 м.) (красные линии на рисунке 10) превышают значения, характеризующие центральную часть плюма (красные линии на рисунке 9), что также наблюдалось при измерениях *in situ* (синие и черные линии на рисунке 8). Как и в центральной части плюма, на начальном этапе конвекции глубина смешанного слоя в его восточной части неуклонно увеличивается под воздействием относительно небольшого охлаждения воздуха и относительно низкоскоростного ветра (Рис. 12). Промежуточный этап конвекции начинается после того, как конвективный слой распространится на глубину  $\sim 11$  м., где наблюдается значительный градиент солености. Как и в центральной части плюма, дальнейшее увеличение конвективного слоя по вертикали может быть вызвано сильными ветрами и/или большой разностью температур воздуха и моря (серые полосы на Рис. 12). Понижение температуры на поверхности моря до температуры максимальной плотности ( $-1,8^{\circ}\text{C}$ ) в конце октября останавливает процесс углубления конвективного слоя.



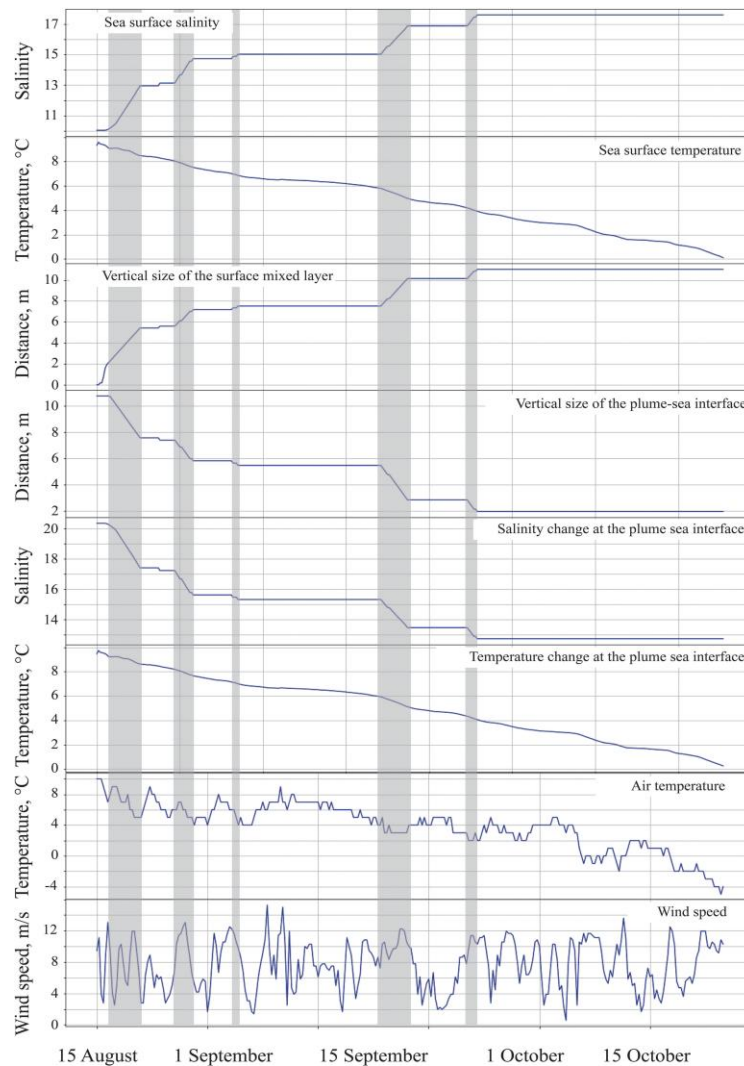
Глубина (м.)  
24 августа

Соленость  
26 сентября

Температура (°C)

**РИСУНОК 10**

Вертикальная структура солености (слева) и температуры (справа) в восточной части плюма Оби - Енисея в середине августа (зеленая линия) и позднего октября (красная линия) в соответствии с измерениями (сплошные линии) и данным численной модели (пунктирные линии). Места выполнения измерений in situ обозначены белыми стрелками в правой части Рисунка 8.

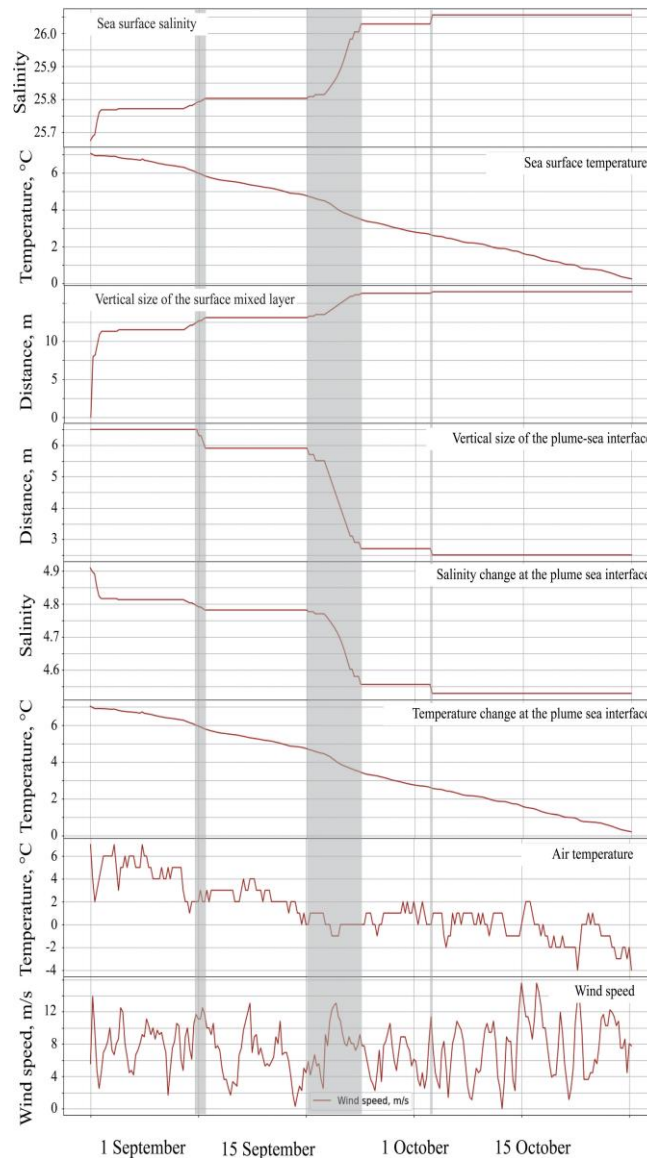


Скорость ветра (м/с)	Температура (°C)	Соленость	Расстояние (м.)
Соленость морской поверхности	Температура морской поверхности	Размер поверхностного слоя перемешивания по вертикали	Размер границы между плюмом и морем по вертикали
Изменение температуры на границе между плюмом и морем	Температура воздуха	Изменение солености на границе между плюмом и морем	Скорость ветра
15 августа	1 сентября	15 сентября	1 октября
		1 октября	15 октября

**РИСУНОК 11**

Поверхностная соленость (А) и температура (В); размеры слоя перемешивания по вертикали (С) и границы между плюмом и морем (D); изменение температуры (Е) и солености (F) на границе между плюмом и морем, температуры воздуха (G) и скорости ветра (H) во время численного моделирования вертикальной структуры центральной части плюма Оби - Енисея в период с середины августа по конец октября. Серыми полосками обозначены периоды интенсивной конвекции.

Единственные участки пюма Оби - Енисея, где ни измерения *in situ*, ни численное моделирование не зафиксировали резкий и узкий градиент солености на нижней границе пюма, - это области Обской губы и Енисейского залива. Поверхностная соленость на этих участках остается относительно низкой (4 - 7) даже в августе и сентябре, поэтому соответствующие температуры максимальной плотности относительно высоки (4 - 6°C). Таким образом, охлаждающее воздействие на плотность воды невелико, и вертикальная конвекция не проникает до границы между пюмом и морем. В частности, численное моделирование конвекции в Обской губе показывает, что этот процесс не распространяется на глубину ниже 4 - 6 м. и не влияет на придонную границу пюма, что соответствует результатам измерений *in situ* (желтые линии на Рис. 8).



Скорость ветра (м/с)	Температура (°C)	Соленость	Расстояние (м.)
Соленость морской поверхности	Температура морской поверхности	Размер поверхностного слоя перемешивания по вертикали	Размер границы между пюмом и морем по вертикали
Изменение температуры на границе между пюмом и морем	Изменение солености на границе между пюмом и морем	Температура воздуха	Скорость ветра
1 сентября	15 сентября	1 октября	15 октября

#### РИСУНОК 12

Поверхностная соленость (А) и температура (В); размеры поверхностного слоя перемешивания по вертикали (С) и границы между пюмом и морем (D); изменение температуры (Е) и солености (F) на границе между пюмом и морем, температуры воздуха (G) и скорости ветра (H) во время численного моделирования вертикальной структуры восточной части пюма Оби - Енисея в период с середины августа по конец октября. Серыми полосками обозначены периоды интенсивной конвекции.

## 5 Выводы

Настоящее исследование содержит данные измерений *in situ*, выполненных в конце октября в Карском море, т.е. в начале холодного сезона и незадолго до образования морского льда. Эти измерения выявили две особенности плюма Оби - Енисея: во-первых, однородную вертикальную структуру от поверхности до нижней границы плюма и, во-вторых, аномально резкий скачок солёности на этой границе, достигающий значения 10 - 12 на вертикальном расстоянии 1 - 2 м. Оба фактора распространяются практически на всю территорию плюма Оби - Енисея, исключая область речных устьев, т.е. Обской губы и Енисейского залива. Такие свойства плюма сформировались в течение нескольких недель октября, поскольку не они не наблюдались в ходе многочисленных измерений *in situ*, проведенных в Карском море в период августа - сентября в предыдущие годы.

Данные численного моделирования свидетельствуют, что указанные особенности были обусловлены осенней конвекцией, которая образовалась в плюме Оби - Енисея в середине осени. Перенос холодного воздуха с континента в Карское море и усиление ветрового воздействия в этот период привели к интенсивному охлаждению поверхностного слоя плюма и его последующему перемешиванию с другими слоями. Был проведен ряд наблюдений и исследований, посвященных конвективным процессам во многих районах Мирового океана, особенно в Гренландском и Лабрадорском морях, море Уэдделла и Средиземном море, где они приводят к формированию чрезвычайно глубоких (> 1000 м.) слоев перемешивания (Killworth, 1983; Marshall and Schott, 1999; Lavender et al., 2002; Houpert et al., 2016; Cheon and Gordon, 2019). В то же время нам не известно ни об одном исследовании, которое рассматривает вопросы конвекции в речных плюмах и ее воздействия на вертикальную структуру плюмов.

Конвекция привела к углублению слоя перемешивания и гомогенизации вертикальной термохалинной структуры плюма Оби - Енисея. Процесс конвекции вызвал снижение умеренного градиента солёности на вертикальной границе между плюмом и морем и прекратился только после того, как слой перемешивания распространился до слоя солёной морской воды. В результате образовался узкий (1 - 2 м.) скачок солёности между плюмом Оби - Енисея и нижележащими солёными морскими водами. Численное моделирование показало, что наиболее интенсивная конвекция обычно возникала во время штормовых явлений, характеризующихся скоростью ветра > 10 - 11 м/с и разностью температур воздуха и моря > 2 - 2,5°C. В такие периоды глубина конвективного слоя увеличивалась на 1 м. в день. Конвекция в плюме Оби - Енисея наблюдается только в сентябре и октябре, поскольку в начале ноября процесс образования льда в плюме препятствует взаимодействию между воздухом и морем. Тем не менее, с учетом относительно небольшой глубины плюма Оби - Енисея (10 - 15 м.) вертикальная структура плюма может измениться даже за оговоренный короткий период времени. Единственными участками плюма, которые не подвержены конвекции, являются области Обской губы и Енисейского залива по причине низкой поверхностной солёности и обусловленных этим высоких температур максимальной плотности.

Полученные результаты могут быть использованы для изучения других речных плюмов, расположенных в полярных и умеренных широтах с низкими зимними температурами. В частности, подобная осенняя конвекция и формирование узкого и резкого градиента солёности на нижней границе плюма может наблюдаться в прочих крупных речных плюмах в Северном Ледовитом океане, например, плюмах Лены, Маккензи, Юкона, Колымы, Печоры, Хатанги, Индигирки (Mulligan et al., 2010; Mulligan and Perrie, 2019; Осадчиев и др., 2020a; Осадчиев и др. 2020c; Осадчиев и др. 2021c; Спивак и др., 2021; Clark and Mannino, 2022; Рогожин и др., 2023). Однако возможная осенняя конвекция в



указанных плюмах пока не изучена по причине чрезвычайно сложных погодных и ледовых условий в арктических морях незадолго до и во время образования льда. Формирование резкого градиента солености на границе между плюмом и морем незадолго до формирования льда уменьшает трение между речным плюмом и нижележащими морскими водами. Указанная особенность может существенно повлиять на последующее распространение речных плюмов, обусловленное их плавучестью, на глубине ниже уровня морского льда, который изолирует плюмы от ветровых воздействий. Таким образом, результаты данного исследования важны для понимания процессов переноса и трансформации крупных речных плюмов под морским льдом зимой и весной. На данный момент эти вопросы, относящиеся к крупномасштабному обороту пресной воды в Северном Ледовитом океане, представляют собой неизученную область (Осадчиев, 2021).

### Заявление о доступности данных

Оригинальные материалы, представленные в исследовании, включены в настоящую статью / Дополнительные материалы. Возникающие вопросы следует направлять соответствующему автору.

### Вклад авторов

А.А. Осадчиев - составление плана работы; З.В. Забудкина и Р.О. Седаков - организация полевых исследований; А.А. Осадчиев, В.С. Рогожин, Д.И. Фрей, А.С. Гордей, Э.Я. Спивак, А.Н. Салюк и Р.О. Седаков - анализ данных *in situ*; З.В. Забудкина - выполнение численного моделирования. Все авторы внесли свой вклад в подготовку статьи и утвердили представленную версию.

### Финансирование

Финансирование данного исследования осуществлялось Российским научным фондом в рамках исследовательского проекта 22-27-00552.

### Благодарности

Авторы выражают признательность Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (Госкорпорация «Росатом») и Центру морских исследований Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ЦМИ МГУ) за предоставление необходимых данных, которые были собраны в ходе проекта по мониторингу экологических условий в арктических морях России в 2021 году. Кроме того, авторы приносят благодарность группе компаний «СКАНЭКС» (ГК «СКАНЭКС») за обеспечение требуемыми данными АИС.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют, что исследование проводилось в отсутствие каких-либо коммерческих или финансовых отношений, которые могут быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

### Примечание издателя

Все заявления, представленные в настоящей статье, принадлежат исключительно ее авторам и не обязательно отражают точку зрения их аффилированных организаций, а

также издателя, редакторов и рецензентов. Издатель не дает никаких гарантий и заверений в отношении продуктов, которые могут рассматриваться в статье, и заявлений их производителей.

### **Дополнительные материалы**

Дополнительные материалы к данной статье размещены в интернете по адресу:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2023.1129331/full#supplementary-material>.