

УДК 551.465

О ВЕТРОВОМ МЕХАНИЗМЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ЛИНЗЫ ОПРЕСНЕННЫХ РЕЧНЫМ СТОКОМ ВОД В КАРСКОМ МОРЕ

© 2017 г. А. Г. Зацепин¹, П. О. Завьялов¹, В. И. Баранов², В. В. Кременецкий¹,
А. А. Недоспасов¹, С. Г. Поярков¹, В. В. Очередник²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Краснодарский край, Россия
e-mail: zatsepin@ocean.ru

Поступила в редакцию 23.09.2016 г.

После доработки 03.10.2016 г.

Рассмотрен возможный механизм трансформации вод опресненной линзы в Карском море под влиянием вертикального турбулентного перемешивания, вызываемого ветровым воздействием. На основе простой одномерной модели показано, что наиболее сильной трансформации подвергаются края линзы – ее фронтальная зона, где толщина слоя опресненных вод – наименьшая. Из-за сильной (кубической) нелинейности зависимости потока турбулентной энергии от скорости ветра, значительная трансформация фронтальной зоны линзы происходит во время штормовых событий. Серия последовательных штормов может вызывать горизонтальное дробление линзы на несколько зон – поясов, соленость которых возрастает по мере приближения к краю линзы.

DOI: 10.7868/S0030157417010221

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее характерных черт гидрологической структуры Карского моря является наличие в нем в летне–осеннее время поверхностного опресненного слоя (ПОС), формируемого в южной части моря стоком Оби и Енисея и покрывающего значительную часть акватории моря [4, 5].

Имея меньшую плотность, чем морские, речные воды распространяются в верхнем слое толщиной порядка 10–15 м в виде линзы. По мере удаления от устья реки соленость вод верхнего слоя в среднем увеличивается за счет перемешивания речных и морских вод. При этом изменение солености происходит не равномерно и постепенно, а имеет неоднородный “скачкообразный” характер, вследствие нелинейности и изменчивости процессов взаимодействия речных вод с окружающим морем и приводным слоем атмосферы [1]. Другими словами, линза опресненных вод содержит внутри себя фронтальные разделы. Часть из них связана с вихрями, на которые дробится линза опресненных вод, вероятно, в результате бароклинно-баротропной неустойчивости [2, 8]. Фронтальные разделы могут, по-видимому, образовываться также на границах опресненных вод различного происхождения: “обского” и “енисейского”. Однако некоторые из этих фронтов связаны с ветровым воздействием, которое весьма изменчиво и бывает достаточно сильным.

Условием сохранения линзы опресненных вод, по крайней мере на протяжении нескольких месяцев (июль–октябрь), является большой перепад плотности через границу раздела опресненных вод с морскими. Он достигает двух десятков единиц условной плотности, поэтому процессы вовлечения морской воды в линзу опресненных речным стоком вод протекают слабо даже при воздействии на нее сильных ветров [2, 3]. Однако условие слабого вовлечения выполняется в том случае, когда линза уже сформировалась и имеет достаточную толщину. На начальном этапе своего образования, когда она сравнительно тонкая (первые метры по вертикали), процессы вовлечения происходят, по-видимому, достаточно активно. Об этом свидетельствуют, в частности, результаты работ [10, 11], в которых описываются процессы трансформации речных вод в прибрежной зоне моря на основе наблюдений и моделирования. В них показано, что сама область трансформации состоит из двух частей: ближней и дальней. В ближней ее части, расположенной вблизи устья реки, перемешивание морских и речных вод происходит благодаря энергии сдвига скорости инерционного течения, порождаемого речным стоком, а также ветровому воздействию. В дальней (мористой) ее части, где инерционное течение ослабевает, основную роль в трансформации вод играет ветровое воздействие.

При этом наиболее уязвимыми для вертикального перемешивания являются края линзы, где

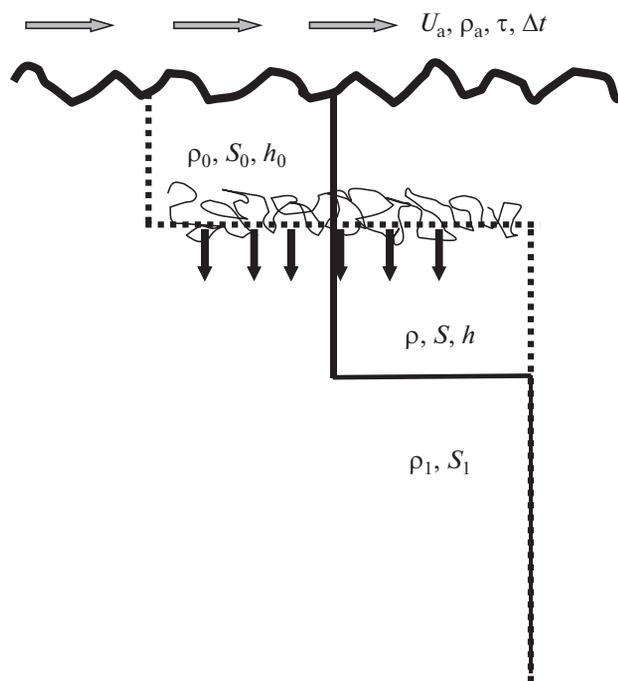


Рис. 1. Схема процесса заглубления и осолонения верхнего перемешанного слоя за счет турбулентного вовлечения более соленой воды из нижележащего слоя при ветровом воздействии.

толщина слоя опресненных вод невелика. Имеются свидетельства того, что именно фронтальная зона линзы подвергается разрушению во время штормовых воздействий [9]. В данной статье предлагается простая одномерная модель, позволяющая теоретически обосновать эффект трансформации фронтальной зоны линзы под действием турбулентности, генерируемой напряжением трения ветра. После прекращения сильного ветрового воздействия происходит рестратификация краевой (фронтальной) зоны линзы, однако солёность в области, подвергшейся перемешиванию, повышается за счет вовлечения морских вод, и эта зона отделяется от вод основной линзы новообразовавшимся солёным фронтом. В трансформированной в результате ветрового воздействия краевой зоне линзы наблюдается, как правило, повышенная биологическая продукция, вызванная вовлечением биогенных элементов из более глубоких слоев воды в стратифицированный приповерхностный слой. Это означает, что данный процесс оказывает влияние и на биотическую составляющую экосистемы Карского моря [6, 7].

Таким образом, в результате квазипериодического воздействия сильных ветров может происходить “дробление” краевой (фронтальной) зоны линзы на ряд областей, между которыми происходит заметное изменение солёности вод. В работе приводятся некоторые примеры наблюдений

трансформации краевой зоны опресненной линзы и ее возможного “дробления” из-за ветрового воздействия, выполненных в 59-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре 2011 г.

МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ ЛИНЗЫ ОПРЕСНЕННЫХ ВОД

Возникают вопросы: как дробится фронтальная зона линзы и осолоняются ее воды, и как они трансформируются? Подобная трансформация невозможна без затрат механической энергии, требуемой для перемешивания менее плотных опресненных речным стоком вод с более плотными морскими водами. В верхнем слое моря основным источником энергии перемешивания является ветер. Ветровое воздействие турбулизирует верхний квазиоднородный слой моря (ВКС). Большая часть энергии турбулентности диссипирует из-за вязкого трения, но некоторая ее доля расходуется на вовлечение в ВКС более плотной воды снизу. Если ВКС опреснен речным стоком, то происходит вовлечение более соленой нижележащей воды и ее перемешивание с более пресными водами верхнего слоя. При этом верхний слой осолоняется, а его толщина увеличивается.

Схема процесса заглубления и уплотнения верхнего слоя за счет турбулентного вовлечения жидкости из подстилающего слоя представлена на рис. 1.

Для количественных оценок описанного выше процесса будем считать, что стратификация жидкости двухслойна, верхний слой характеризуется исходной плотностью ρ_0 и толщиной h_0 , нижний — плотностью ρ_1 , и он изначально много толще верхнего. Профиль плотности воды, соответствующий начальному состоянию двухслойной системы, изображен на рисунке точечным пунктиром. Ветровое воздействие отражено на рис. 1 в виде взволнованной поверхности моря, а также указанных параметров атмосферы, включающих скорость ветра U_a , плотность воздуха ρ_a и напряжение трения ветра τ на поверхности моря. После окончания действия ветра определенной силы и продолжительности, за счет турбулентного вовлечения более плотной воды из нижнего слоя в верхний, произойдет уплотнение верхнего слоя до плотности ρ и его утолщение до глубины h . Профиль плотности воды, соответствующий конечному состоянию двухслойной системы, изображен на рис. 1 толстой сплошной линией.

Примем, что на увеличение потенциальной энергии верхнего слоя за счет его уплотнения и заглубления затрачивается определенная доля потока энергии турбулентности, поступающей от ветра, имеющего на высоте 10 м над уровнем моря скорость U_a (пусть она будет постоянной) и про-

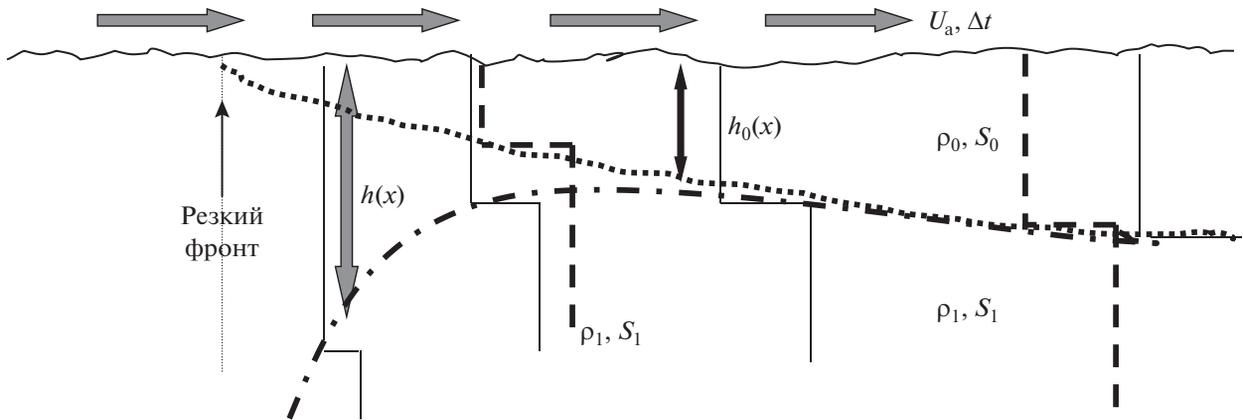


Рис. 2. Схема трансформации толщины слоя опресненных вод в краевой (фронтальной) части линзы.

должительность действия Δt . Будем также считать, что обмен массой (теплом, солью) между верхним слоем и атмосферой отсутствует. Тогда в качестве исходных имеем два уравнения:

$$(g'h)dh/dt = 2\gamma U_*^3, \quad (1)$$

$$g'_0 h_0 = g'h. \quad (2)$$

Здесь $U_* = (\tau/\rho_w)^{0.5} = (C_d \rho_a/\rho_w)^{0.5} U_a \approx 1.3 \times 10^{-3} U_a$ — динамическая скорость трения в воде; τ — напряжение трения ветра на поверхности моря; $C_d \approx 1.3 \times 10^{-3}$ — коэффициент сопротивления морской поверхности; $\rho_a \approx 1.3 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха; $\rho_w = 10^3 \text{ кг/м}^3$ — плотность воды; U_a — скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря; $\gamma = 0.05 - 0.25$ — коэффициент полезного действия [11]; $g'_0 = g\Delta\rho_0/\rho_1$ и $g' = g\Delta\rho/\rho_1$ — редуцированное ускорение свободного падения (начальное и текущее значения соответственно), а $\Delta\rho_0 = (\rho_1 - \rho_0)$ и $\Delta\rho = (\rho_1 - \rho)$ — перепад плотности через границу раздела между слоями (начальное и текущее значения соответственно).

Решение системы уравнений (1)–(2) имеет вид

$$h = h_0 + 8.8 \times 10^{-9} (\gamma U_a^3 / g'_0 h_0) \Delta t. \quad (3)$$

Здесь Δt — интервал времени интегрирования системы уравнений (1) и (2), соответствующий продолжительности ветрового воздействия.

Из (3) следует, что увеличение толщины верхнего слоя пропорционально кубу скорости ветра. Это означает, что увеличение скорости ветра в 2 раза приводит к восьмикратному ускорению скорости заглубления и осолонения верхнего слоя!

Нетрудно привести (3) к безразмерному виду и оценить относительное увеличение толщины верхнего слоя и его относительное уплотнение (осолонение):

$$\begin{aligned} (h - h_0)/h_0 = \Delta h/h_0 &= (\rho - \rho_0)/\Delta\rho = \\ &= 8.8 \times 10^{-9} (\gamma U_a^3 / g'_0 h_0^2) \Delta t. \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) следует, что относительное увеличение толщины слоя $\Delta h/h_0$ и приращение его плотности $(\rho - \rho_0)/\Delta\rho$ квадратично убывают с увеличением толщины слоя h_0 . Это означает, что достаточно толстые слои воды (центральная часть опресненной линзы) ведут себя консервативно и слабо изменяют свои характеристики даже под действием сильного ветра, тогда как тонкие (краевая (фронтальная) часть линзы) сравнительно легко утолщаются и уплотняются под ветровым воздействием.

Схематически трансформация толщины верхнего слоя опресненных вод изображена на рис. 2. Начальное положение плотностной границы раздела линзы с окружающими морскими водами обозначено мелким точечным пунктиром. Крупным пунктиром изображены профили плотности воды в различных областях опресненной линзы. Начальное состояние линзы, как и на рис. 1, характеризуется следующими параметрами: плотностью ρ_0 , соленостью S_0 и толщиной слоя опресненных вод $h_0(x)$, где x — горизонтальная координата, отсчитываемая от края (фронта) линзы на морской поверхности. Конечная толщина опресненной линзы $h(x)$ после ветрового воздействия и турбулентного вовлечения обозначена штрихпунктиром. Как следует из соотношения (3), при приближении к исходному фронтальному разделу опресненной линзы на поверхности моря толщина трансформированного ветровым воздействием и турбулентным вовлечением верхнего слоя опресненных вод гиперболически стремится к бесконечности. Фактически это означает, что наиболее тонкая краевая часть линзы перемещается с окружающей водой.

Рассмотрим более детально трансформацию поступающих в море речных вод во время и после ветрового воздействия (рис. 3). До начала действия сильного ветра эти воды распространяются поверх морских соленых вод в виде клина, толщина которого постепенно убывает в направлении его распространения вплоть до нуля (рис. 3а).

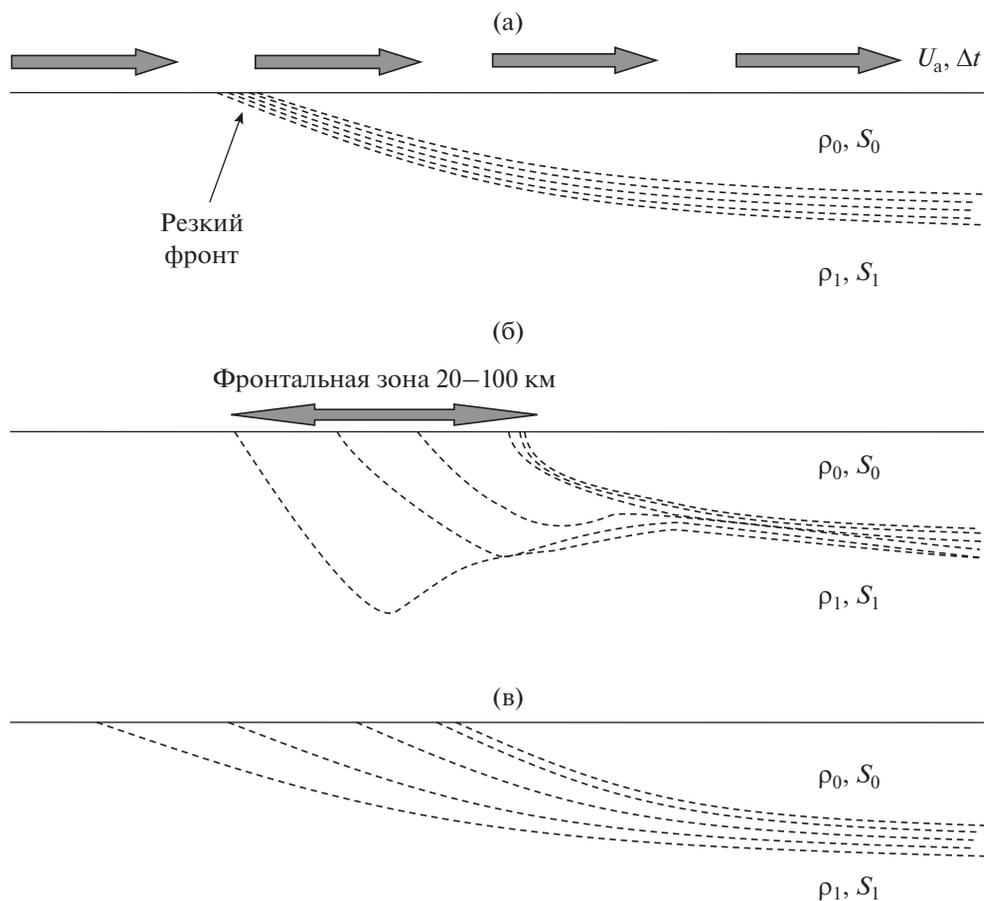


Рис. 3. Схема заглубления и осолонения фронтального края опресненной линзы в результате ветрового воздействия: (а) – положение границы раздела между верхним и нижним слоями до ветрового воздействия; (б) – образование промежуточной водной массы между мало трансформированными водами линзы и окружающими ее морскими водами; (в) – формирование новой фронтальной области в результате распространения трансформированной водной массы.

В этом месте наблюдается резкий фронт на поверхности моря, где плотность воды практически скачком изменяется от ρ_0 до ρ_1 . Как уже указывалось, во время шторма наибольшему заглублению и осолонению подвергается именно наиболее тонкая “носовая” часть клина. Вследствие этого трансформированный штормовым перемешиванием клин вод будет состоять как бы из двух частей: значительно трансформированной носовой части и слабо трансформированной тыловой (рис. 3б). Из-за того что соленость воды в носовой части не является однородной, эта часть клина после штормового воздействия рестратифицируется, растекается по горизонтали и превращается в новый фронтальный раздел, где изопикны выходят на поверхность (рис. 3в).

Поскольку поступление речных вод в море происходит квазинепрерывно, нетрансформированная и трансформированная части этих вод будут постепенно продвигаться в сторону открытого моря. При новом штормовом событии клин трансформированной части опресненных вод

вновь разделится на две части: носовую, которая преобразуется еще сильнее, и тыловую, которая подвергнется меньшей трансформации. Следуя вышеописанному сценарию, опресненные воды линзы, прилегающие к устью реки, после нескольких штормовых воздействий будут состоять из ряда поясов, разделенных фронтальными разделами, при этом соленость воды будет возрастать от пояса к поясу в мористом направлении.

Следует также затронуть вопрос о влиянии направления ветра на описанный выше процесс перемешивания и трансформации вод краевой (фронтальной) зоны опресненной линзы. Из физических соображений следует, что ветровое воздействие может либо способствовать утончению фронтального клина, либо препятствовать этому. Поэтому степень трансформации вод фронтальной зоны линзы должна также зависеть и от направления действия ветра.

В следующем разделе статьи приводятся некоторые примеры того, как описанный выше механизм ветрового перемешивания вод фронтальной

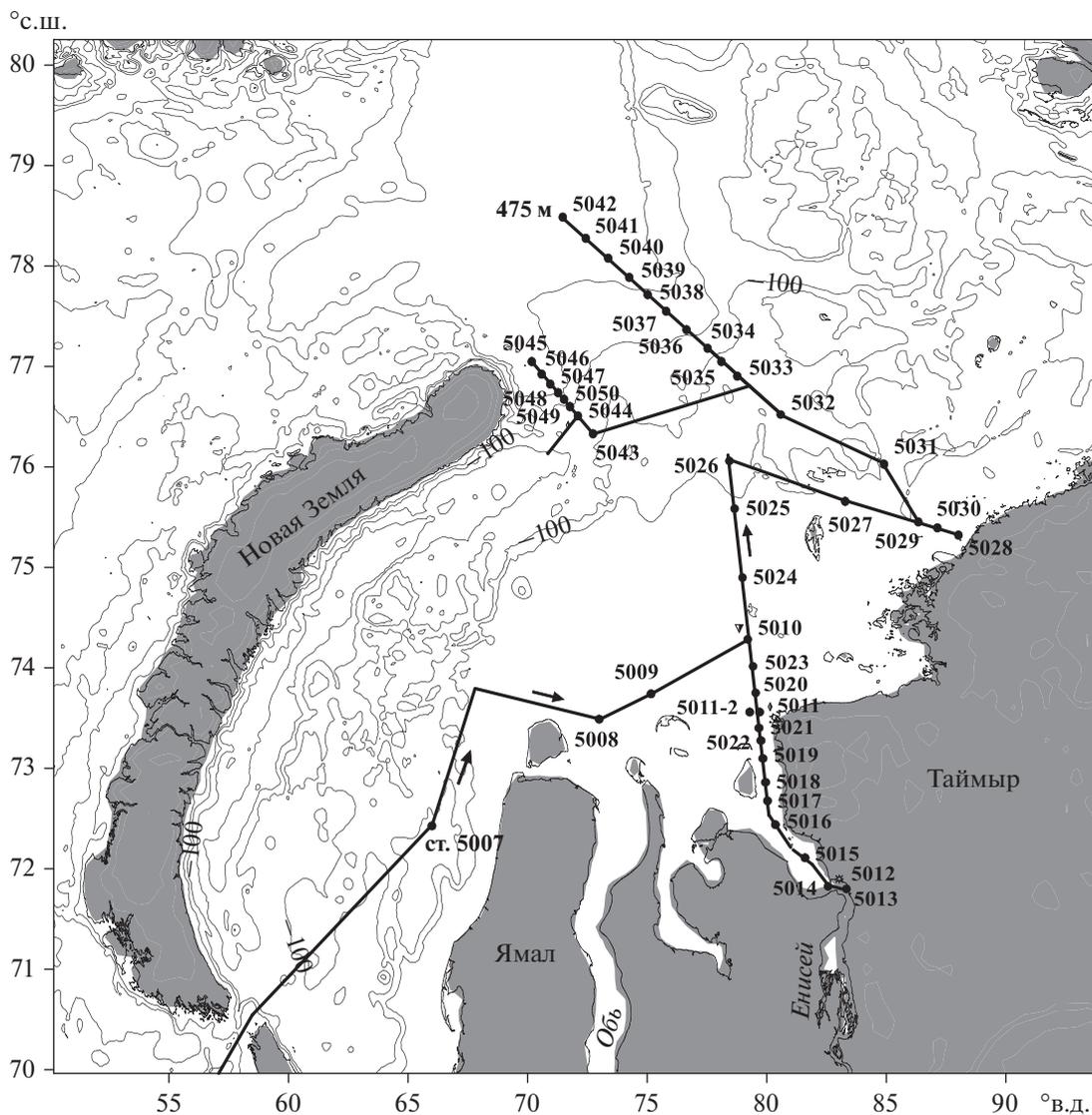


Рис. 4. Карта-схема судовых разрезов со станциями, выполненными в 59-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”.

зоны линзы может реализовываться в Карском море.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ОПРЕСНЕННОЙ ЛИНЗЫ НА ЕНИСЕЙСКОМ ВЗМОРЬЕ

Возможное проявление влияния ветрового воздействия на фронтальную структуру вод опресненной линзы было зарегистрировано в 59-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” на Енисейском разрезе. На данном разрезе, на переходе с севера на юг от Енисейского взморья (ст. 5010) в устье реки (ст. 5013), 17–18 сентября 2011 г. выполнялось профилирование водной толщи буксируемым сканирующим зондом (БСЗ) “Рыбка”, а на пути обратно с юга на север — комплексные океанологические станции (рис. 4).

Благодаря большой частоте зондирований БСЗ “Рыбка” по ее данным удастся представить тонкую горизонтальную и вертикальную структуру фронтальных зон и разделов в области перехода от морских умеренно солоноватых вод (станции 5010–5011) к практически пресным речным (станции 5012–5013). При этом фронтальные разделы идентифицируются по наклонным сгущениям изолиний, выклинивающимся либо к поверхности, либо ко дну.

На рис. 5 представлен большой фрагмент Енисейского разреза в поле солёности, построенного по данным БСЗ “Рыбка”. Левый край этого фрагмента находится примерно у места расположения ст. 5016 в устье реки, а его правый край приблизительно соответствует положению ст. 5021 у северной оконечности Енисейского залива на траверзе

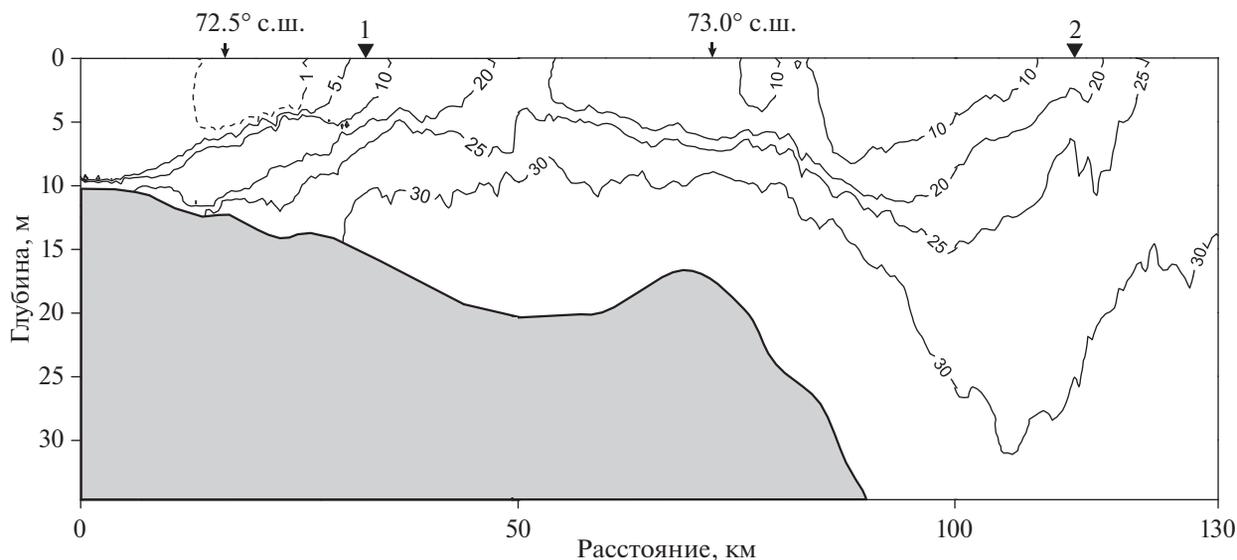


Рис. 5. Распределение солёности воды (psu) на выбранном участке Енисейского разреза по данным БСЗ “Рыбка”.

Таймыра (см. рис. 4). Общая длина приведенного участка разреза составляет 130 км. Два основных фронтальных раздела в поверхностном слое отделяют друг от друга воды разной солёности (рис. 5). Фронт на удалении 30–35 км от левого края рисунка, расположенный примерно у $72^{\circ}40'$ с.ш. между станциями 5016 и 5017, разделяет практически пресную (0–10 psu) воду от сильно опресненной (10–20 psu), простирающейся до 75 км по разрезу. Фронт на удалении 110–120 км по разрезу примерно на $73^{\circ}25'$ с.ш. в окрестности ст. 5021 разделяет сильно опресненную воду от умеренно опресненной солоноватой (20–30 psu), которая занимает большую часть акватории Карского моря и представляет собой собственно ПОС [2, 3]. Следует отметить, что между выделенными фронтами располагается зона меандра более соленых вод, который “разрывает” непрерывную структуру енисейских вод, распространяющихся на север вдоль побережья Таймыра.

Наше предположение заключается в том, что в период распространения речных вод по Енисейскому заливу до взморья они, как минимум, один раз подвергались сильному ветровому воздействию. На рис. 6 приведена зависимость функции U_a^3 (кубической скорости приземного ветра) от времени (с 1 мая по 1 октября 2011 г.). Графики построены по данным одноградусного реанализа NCEP для двух точек в области выполненного Енисейского разреза: одной – на широте 72° с.ш. (начало разреза, рис. 6а), другой – на широте 73° с.ш. (середина разреза, рис. 6б). Для удобства интерпретации эти графики сглажены с окном 10 суток. Из них следует, что события сильного ($U_a^3 \geq 400 \text{ м}^3/\text{с}^3$) и продолжительного ветра наблю-

даются приблизительно раз в три–четыре недели, причем по фазе эти события практически совпадают друг с другом для обеих выбранных точек. Однако сила ветра была существенно больше на 73° с.ш., где меньше экранирующее влияние берегов.

Можно ожидать, что фронтальная зона опресненных вод енисейского происхождения испытывает трансформацию с указанной выше временной периодичностью. Следует отметить, что последнее в выбранном периоде времени достаточно интенсивное ветровое воздействие происходило всего за несколько дней до выполнения Енисейского разреза, а предыдущее и наиболее сильное – в третьей декаде августа (рис. 6).

Предположим, что именно эти ветра привели к трансформации фронтальной зоны опресненных вод, вытекающих из устья Енисея. Проведем оценку ширины зоны сильной трансформации вод для последнего ветрового воздействия, основываясь на формуле (4). При этом будем считать, что граница этой зоны определяется значением $\Delta h/h_0 = 1$, которое соответствует условию удвоения первоначальной толщины слоя опресненных вод в результате ветрового воздействия. С помощью (4) вычислим значение h_0 , при котором выполняется это условие. Для расчетов будем использовать следующие величины определяющих параметров: $\gamma = 0.2$; $U_a^3 = 400 \text{ м}^3/\text{с}^3$; $g'_0 = 0.12 \text{ м}/\text{с}^2$, $\Delta t = 5.2 \times 10^5 \text{ с}$ (~6 суток), которые приблизительно соответствуют условиям сильного ветрового воздействия в сентябре. Подставляя указанные выше значения в (4), получим: $h_0 = 1.8 \text{ м}$. Считая, что тангенс угла наклона фронта опресненного клина к горизонтали составляет $\text{tg} \alpha = 2.5 \times 10^{-4}$ градуса,

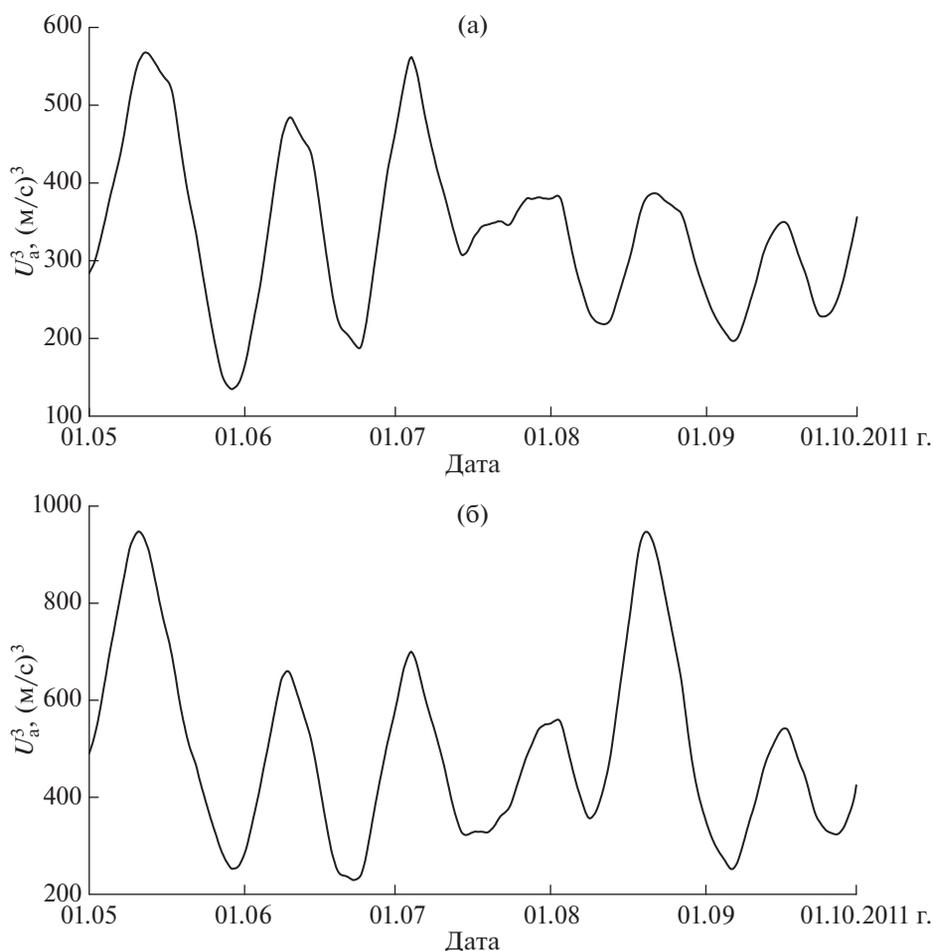


Рис. 6. Временной ход осредненной с окном 10 суток скорости приземного ветра (U_a^3 , (м/с)³) за период с 01.05 по 01.10.2011 г. в точках: (а) – 72° с.ш., 80° в.д. (начало Енисейского разреза) и (б) – 73° с.ш., 80° в.д. (середина Енисейского разреза).

получим: $L_{тр} = h_0 / \text{tg} \alpha = 7.2$ км. Это значение приблизительно соответствует расстоянию, на котором соленость клина енисейских вод изменяется от 0–1 psu до 10 psu на удалении 30–40 км от начала разреза. Соответственно, располагающаяся на разрезе между 85 и 110 км трансформированная водная масса с соленостью порядка 10 psu могла сформироваться, главным образом, в результате двух сильных ветровых воздействий – августовского и сентябрьского (см. рис. 6).

Характерное расстояние между основными поверхностными фронтальными разделами на Енисейском разрезе составляет 80 км. Если считать, что скорость распространения опресненных вод на север вдоль побережья Таймыра не превышает 3–4 см/с (оценка выполнена по нескольким последовательным спутниковым снимкам), то время перемещения этих вод на вышеуказанное расстояние будет от 20 до 27 суток. Такой временной масштаб соответствует характерной для этого

района периодичности сильных ветровых воздействий (см. рис. 6). Таким образом, сильные ветровые воздействия, происходящие с интервалом несколько недель, вполне могли обеспечить наблюдаемую трансформацию пресноводного стока на пути от устья Енисея на взморье.

В ходе дальнейших экспедиционных исследований представляется целесообразным провести специальные исследования влияния ветрового воздействия на трансформацию вод, а также на процессы фронтолиза и фронтогенеза в краевых областях линзы. Для детального изучения закономерностей трансформации вод опресненной линзы представляется целесообразным использовать численные и лабораторные модели динамики линзы с учетом вращения Земли, ветрового воздействия, турбулентного перемешивания и вовлечения.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 14-17-00681). Экспедиционные исследова-

ния поддержаны РФФИ (проект № 14-05-05003Кар_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Завьялов П.О., Осадчиев А.А., Ижицкий А.С. и др.* Структура гидрофизических и био-оптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 514–525.
2. *Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др.* Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
3. *Зацепин А.Г., Морозов Е.Г., Пака В.Т. и др.* Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в 2007 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 683–697.
4. *Морецкий В.Н.* Распределение и динамика опресненных вод Карского моря // *Тр. ААНИИ*. 1985. Т. 389. С. 33–35.
5. *Русанов В.П., Васильев А.Н.* Распространение речных вод в Карском море по данным гидрохимических определений // *Тр. ААНИИ*. 1976. Т. 323. С. 188–196.
6. *Суханова И.Н., Флинт М.В., Дружкова Е.И. и др.* Фитопланктон северо-западной части Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 605–619.
7. *Флинт М.В., Семенова Т.Н., Арашкевич Е.Г. и др.* Структура зоопланктонных сообществ в области эстуарной фронтальной зоны реки Обь // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 809–822.
8. *Griffiths R.W., Hopfinger E.S.* The structure of meso-scale turbulence and horizontal spreading of ocean fronts // *Deep-Sea Res.* 1984. V. 31. № 3. P. 245–269.
9. *Hetland R.D.* Relating river plume structure to vertical mixing // *J. Phys. Oceanogr.* 2005. V.35. P.1667–1688.
10. *Horner-Devine A.R., Hetland R.D., MacDonald D.G.* Mixing and Transport in Coastal River Plumes // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2016. P. 569–594.
11. *Linden P.F.* The deepening of mixed layer in a stratified fluid // *J. Fluid mech.* 1975. V.71. Pt.2. P. 385–405.

On the Mechanism of Wind Induced Transformation of a River Runoff Water Lens in the Kara Sea

A. G. Zatsepin, P. O. Zavialov, V. I. Baranov, V. V. Kremenetskiy,
A. A. Nedospasov, S. G. Poyarkov, V. V. Ocherednik

A possible mechanism of the transformation of water desalinated lens in the Kara Sea under the influence of vertical turbulent mixing caused by the wind influence is described. On the basis of a simple one-dimensional model it is shown that the strongest transformation occurs at the edge of the lens – its frontal zone, where the thickness of the freshened layer is the smallest. Because of the strong (cubic) nonlinear dependence of the turbulent energy flux on the wind speed, a significant transformation of the frontal zone of the lens occurs during storm events. A series of consecutive storms can cause horizontal lens fragmentation into several zones where the salinity spasmodically increases towards the edge of the lens.