

УДК 551.465

## О ВЛИЯНИИ СТРАТИФИКАЦИИ НА ВЕТРОВОЙ ПЕРЕНОС РЕЧНОГО СТОКА В КАРСКОМ МОРЕ

© 2015 г. Н. В. Журбас<sup>1,2</sup>, П. О. Завьялов<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный

e-mail: nvzhurbas@gmail.com

Поступила в редакцию 17.06.2015 г., после доработки 25.06.2015 г.

Для уточнения механизма образования опресненной линзы, содержащей паводковые воды рек Обь и Енисей, которая была обнаружена в сентябре–октябре 2007 г. в Карском море у восточного побережья островов Новая Земля [2], были проведены численные расчеты траекторий лагранжевых частиц, выпущенных на севере Обско-Енисейского взморья и переносимых дрейфовыми течениями в поверхностном слое моря при реальном ветре. Численные эксперименты проводились с использованием 4 различных алгоритмов расчета скорости поверхностного дрейфа и угла отклонения его направления от направления ветра, два из которых учитывали эффект стратификации плотности, создаваемый опресненным слоем. Показано, что только те модели ветрового дрейфа, которые учитывают наличие стратификации, в состоянии объяснить перенос паводковых речных вод до места обнаружения линзы.

DOI: 10.7868/S0030157415060222

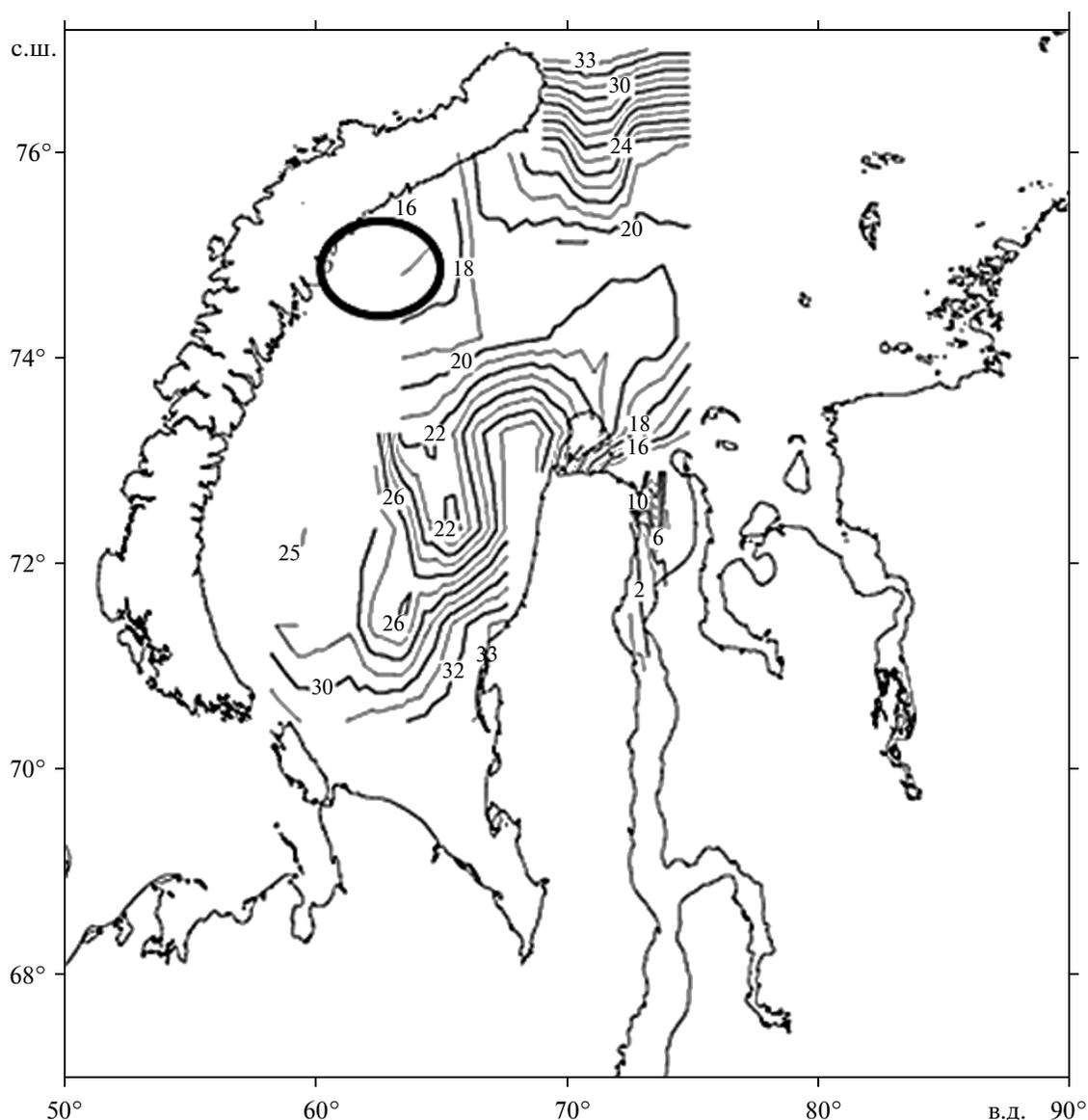
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно классической теории Экмана [5, 6], из-за действия силы Кориолиса дрейфовое течение на поверхности моря направлено под углом  $45^\circ$  вправо (влево) относительно направления ветра в Северном (Южном) полушарии. В данной идеализированной модели абсолютное значение и направление скорости были рассчитаны в предположении о стационарности движения, постоянстве коэффициента вертикального турбулентного обмена и параметра Кориолиса, а также для однородного и бесконечного по глубине океана. Между тем, в действительности в чисто турбулентном потоке вблизи поверхности моря коэффициент турбулентной вязкости может меняться с глубиной [4]. Данный факт был учтен при моделировании дрейфового течения, например, в работе Медсена [9], где было получено аналитическое решение задачи об экмановском дрейфе для случая линейного возрастания коэффициента турбулентного обмена с глубиной (волновые эффекты не учитывались). Медсен показал, что в этом случае угол отклонения направления дрейфового течения на поверхности от направления ветра оказывается существенно меньшим рассчитанного Экманом и составляет при реалистичных значениях входящих в модель коэффициентов приблизительно  $10^\circ$  [9], что подтверждается и некоторыми экспериментальными данными [11, 12].

В указанных моделях дрейфовых течений рассматривалась однородная нестратифицированная жидкость, что является существенной идеализацией.

При учете стратификации появляется возможность смоделировать широкий спектр явлений, например, перенос речного стока в море, когда над более плотной морской водой образуется линза опресненной воды. В работе Прайса и Сандермейера [10] предложена упрощенная модель стационарного ветрового дрейфа в условиях двухслойной стратификации при постоянном коэффициенте турбулентной вязкости внутри каждого слоя, расчеты по которой показали, что наличие стратификации действительно оказывает влияние на перенос. В работе [1] рассмотрена нестационарная задача о влиянии опресненного слоя на ветровой дрейф, и было получено, что при наличии в верхнем слое океана слоя воды пониженной плотности абсолютное значение скорости дрейфового течения и угол его поворота относительно направления ветра увеличиваются относительно “невозмущенного состояния” в условиях отсутствия распресненного слоя у поверхности.

В статье [2] дано подробное описание квазиизолированной линзы опресненной воды, обнаруженной в сентябре–октябре 2007 г. в Карском море у восточного побережья островов Новая Земля между  $74^\circ$  и  $76^\circ$  с.ш. примерно в 400 км и 600 км на ЗСЗ от устьев Оби и Енисея соответственно. Площадь и толщина линзы были оценены в  $4 \times 10^4$  км<sup>2</sup> и 10 м соответственно при характерных значениях солёности на поверхности моря от 16 до 17 епс (рис. 1). Анализ гидрометеорологической ситуации позволил сделать вывод, что формирование опресненной линзы связано с июнь-



**Рис. 1.** Распределение солёности в поверхностном слое юго-западной части Карского моря по данным STD-зонда в проточной системе и положение линзы материковых вод у восточного побережья островов Новая Земля в начале осени 2007 г. [2].

ским паводком — мощным “выбросом” речных вод в море и последующим экмановским переносом опресненных вод на запад в июне—августе под воздействием преобладающего северного ветра.

В работе [2] была выполнена количественная оценка интегральной скорости экмановского переноса опресненных вод на основе представления поверхностного опресненного слоя в виде “пластины” толщиной  $h$ , охваченной движением с постоянной по глубине скоростью. Для того чтобы в течение 75 суток (с начала июня до середины августа) преодолеть расстояние от устьев Енисея и Оби до фактически наблюдавшегося расположе-

ния линзы у восточного побережья островов Новая Земля, средняя скорость переноса опресненной воды должна была составлять 0.06–0.09 м/с. Расчеты, выполненные в работе [2], привели к значениям скорости, которые были ниже ожидавшихся. В статье [3] исследования по выявлению механизмов распространения опресненных вод от Обско-Енисейского взморья по акватории Карского моря были продолжены, и был использован подход, основанный на совместном учете влияния ветрового дрейфа и геострофических течений. Данный метод был успешно верифицирован на основе сопоставления с данными натурных наблюдений в Карском море и спутниковыми изображениями морской поверхности в поле

хлорофилла, из чего следует, что геострофические течения, формирующиеся во фронтальной зоне между опресненными водами и морскими, также играют существенную роль в переносе вод поверхностного опресненного слоя. Учет ветрового воздействия в работе [3] проводился по классической модели Экмана [5, 6].

Целью настоящей работы является попытка объяснить расположение линзы опресненной воды, обнаруженной в сентябре–октябре 2007 г. в Карском море у восточного побережья островов Новая Земля, путем проведения численных расчетов с использованием различных моделей ветрового дрейфа и последующего выявления подходов, наиболее адекватно учитывающих влияние ветрового воздействия на поверхностный слой моря.

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЕТРОВОГО ДРЕЙФА ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕНОСА РЕЧНОГО СТОКА В КАРСКОМ МОРЕ

Мог ли ветровой дрейф “доставить” речные воды из приустьевых районов к юго-восточному побережью островов Новая Земля на широту примерно  $75^\circ$  за время, прошедшее между паводком и экспедиционными наблюдениями? И как стратификация, создаваемая речным стоком, влияет на скорость и направление этого дрейфа? Для ответа на эти вопросы нами были проведены численные эксперименты с расчетом траекторий лагранжевых частиц, переносимых дрейфовыми течениями в поверхностном слое моря при реальном ветре без учета и с учетом эффекта наличия опресненного слоя в верхнем слое моря.

При реализации численных экспериментов использовались сведения о компонентах вектора скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря  $W_x$  и  $W_y$ , взятые из базы метеорологических данных NCEP/NCAR Reanalysis [7], доступной на сайте <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> для свободного скачивания. Эти данные представляют собой временные ряды различных метеопараметров с шагом по времени  $\delta t = 6$  ч за период с 1948 г. по настоящее время на глобальной сетке с шагом около  $2^\circ$  по широте и долготе. Для расчетов были использованы данные на сетке  $25 \times 5$  узлов, попадающие в Карское море и его окрестности в диапазоне  $50^\circ$ – $96^\circ$  в.д. и  $68^\circ$ – $78^\circ$  с.ш. за период времени с 1 мая 2007 г. до 1 ноября 2007 г. Для каждого узла сетки использовались временные ряды  $W_x$  и  $W_y$  длиной 737 элементов с интервалом 6 ч. Рассмотренный период начинался до весеннего паводка и заканчивался после завершения экспедиции в Карское море на НИС “Академик Мстислав Келдыш”. Сначала ряды компонентов скорости ветра  $W_x$  и  $W_y$  были пересчитаны на ря-

ды модуля и направления вектора скорости ветра  $W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$  и  $\varphi_W$  ( $\varphi_W = \arctg(W_y/W_x)$  при  $W_x \geq 0$  и  $\varphi_W = \arctg(W_y/W_x) + \pi$  при  $W_x < 0$ ), а затем модуль скорости ветра был пересчитан на скорость трения ветра  $u_*$  по эмпирической формуле [8]:

$$u_* = \sqrt{1.28 \times 10^{-3} c_D W},$$

$$c_D \times 10^3 = \begin{cases} 1.14 & \text{при } W \leq 10 \text{ м с}^{-1} \\ 0.49 + 0.065W & \text{при } W > 10 \text{ м с}^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

где  $c_D$  – коэффициент сопротивления морской поверхности.

Для расчета траектории лагранжевой частицы, находящейся в данный момент времени в точке с координатами  $(x, y)$  необходимо задать скорость трения  $u_*(x, y)$  и направление ветра  $\varphi_W(x, y)$  в той же точке и в тот же момент времени. Вычисление  $u_*(x, y)$  и  $\varphi_W(x, y)$  производилось методом билинейной интерполяции известных значений  $u_*$  и  $\varphi_W$  в соседних узлах сетки на заданную точку  $(x, y)$  по формуле:

$$F(x, y) = F(0, 0)(1-x)(1-y) + F(1, 0)x(1-y) + F(1, 1)xy + F(0, 1)(1-x)y, \quad (2)$$

где  $F$  – интерполируемая функция от двух переменных, заданная в узлах сетки  $(0, 0)$ ,  $(1, 0)$ ,  $(0, 1)$  и  $(1, 1)$ ,  $0 \leq x \leq 1$  и  $0 \leq y \leq 1$ .

По интерполированному значению  $u_*(x, y)$  тем или иным способом рассчитывался модуль вектора скорости дрейфового течения на поверхности  $V_S(x, y)$  и угол его отклонения от направления ветра  $\varphi_S(x, y)$ . “Новые” значения координат частицы  $(x_{j+1}, y_{j+1})$ , где  $j = 1, 2, 3, \dots, 737$  – индекс времени с интервалом  $\delta t = 6$  ч, находились по формулам:

$$x_{j+1} = x_j + \delta t V_S(x_j, y_j) \cos[\varphi_W(x_j, y_j) + \varphi_S(x_j, y_j)], \quad (3)$$

$$y_{j+1} = y_j + \delta t V_S(x_j, y_j) \sin[\varphi_W(x_j, y_j) + \varphi_S(x_j, y_j)]. \quad (4)$$

Начальное положение частицы задавалось точкой с географическими координатами ( $78^\circ$  в.д.,  $74^\circ$  с.ш.) (точка вблизи северной границы устья Енисея) в момент времени начала суток 1 июня 2007 г., что приблизительно соответствовало времени начала паводка.

Всего были проведены 4 численных эксперимента с различными алгоритмами расчета модуля скорости поверхностного дрейфа  $V_S$  и угла его отклонения  $\varphi_S$  в зависимости от скорости трения, параметра шероховатости, параметра Кориолиса и толщины опресненного слоя:

1. Классическая модель экмановского дрейфа с постоянным коэффициентом вертикальной турбулентной вязкости  $K$  и без учета наличия

опресненного слоя в верхнем слое моря [6]. В этом случае  $\varphi_S = -\pi/4$ ,  $V_S = u_*^2/\sqrt{Kf} = \sqrt{2}u_*/\kappa$ , где  $f$  – параметр Кориолиса,  $\kappa = 0.4$  – постоянная Кармана. Последнее равенство получено при условии, что  $K = \kappa u_* L_E/2$  [1], где  $L_E = \kappa u_*/f$  – глубина Экмана.

2. Модель Медсена [9] с линейным ростом коэффициента турбулентной вязкости с глубиной  $z$  в чисто турбулентном потоке вблизи поверхности моря  $K = \kappa u_* z$  [4]. Зависимости  $V_S = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}$  и  $\varphi_S$  от скорости трения  $u_*$ , параметра шероховатости  $h_S$  и параметра Кориолиса  $f$  без учета наличия поверхностного опресненного слоя находятся из следующего выражения:

$$u_0 + iv_0 = \frac{u_*}{\kappa} \left[ \frac{\pi}{2} + i \left( -1.15 + \ln \frac{L_E}{z_0} \right) \right], \quad (5)$$

где  $z_0 = h_S/30$ ,  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица. Конкретный пробный расчет проводился при значении параметра шероховатости  $h_S = 0.05$  м, рекомендованном в [9]. При расчете по данной модели угол отклонения поверхностного дрейфа от направления ветра был равен приблизительно  $\varphi_S \approx -10^\circ$ .

3. Модель Прайса и Сандермейера [10], в которой стационарный опресненный слой представлен в виде поверхностного слоя толщиной  $h$  с постоянным по глубине коэффициентом турбулентной вязкости, намного превышающим его значение в нижнем слое. В работе [1] решение, полученное в [10], на поверхности (при  $z = 0$ ) было приведено к безразмерным параметрам. В этом случае зависимости  $V_S$  и  $\varphi_S$  от скорости трения  $u_*$ , толщины опресненного слоя  $h$  и параметра Кориолиса  $f$  задаются следующими формулами:

$$\frac{V_S}{V_S(h = \infty)} = \lambda \frac{\sqrt{\exp(8\gamma) - 2\exp(4\gamma)\cos(4\gamma) + 1}}{\exp(4\gamma) - 2\exp(2\gamma)\cos(2\gamma) + 1}, \quad (6)$$

$$\varphi = -\arctg \left( \frac{\exp(4\gamma) + 2\exp(2\gamma)\sin(2\gamma) - 1}{\exp(4\gamma) - 2\exp(2\gamma)\sin(2\gamma) - 1} \right), \quad (7)$$

где  $\gamma = E^{-1/2}$ ,  $\lambda = E^{1/2}$  при  $E \geq 1$  и  $\gamma = E^{-1}$ ,  $\lambda = 1$  при  $E < 1$ ,  $E = L_E/h$  – число Экмана, а  $V_S(h = \infty) = u_*^2/\sqrt{Kf} = \sqrt{2}u_*/\kappa$  – модуль скорости поверхностного дрейфа в однородной по плотности жидкости (согласно решению классической задачи Экмана). Отметим, что формула (6) имеет не соответствующую реальности асимптотику  $V_S \rightarrow \infty$  при  $E \rightarrow \infty$ , что приводит к сильному завышению оценок  $V_S$  при  $E > 15$  [1], и поэтому ее надо применять с осторожностью. Конкретный

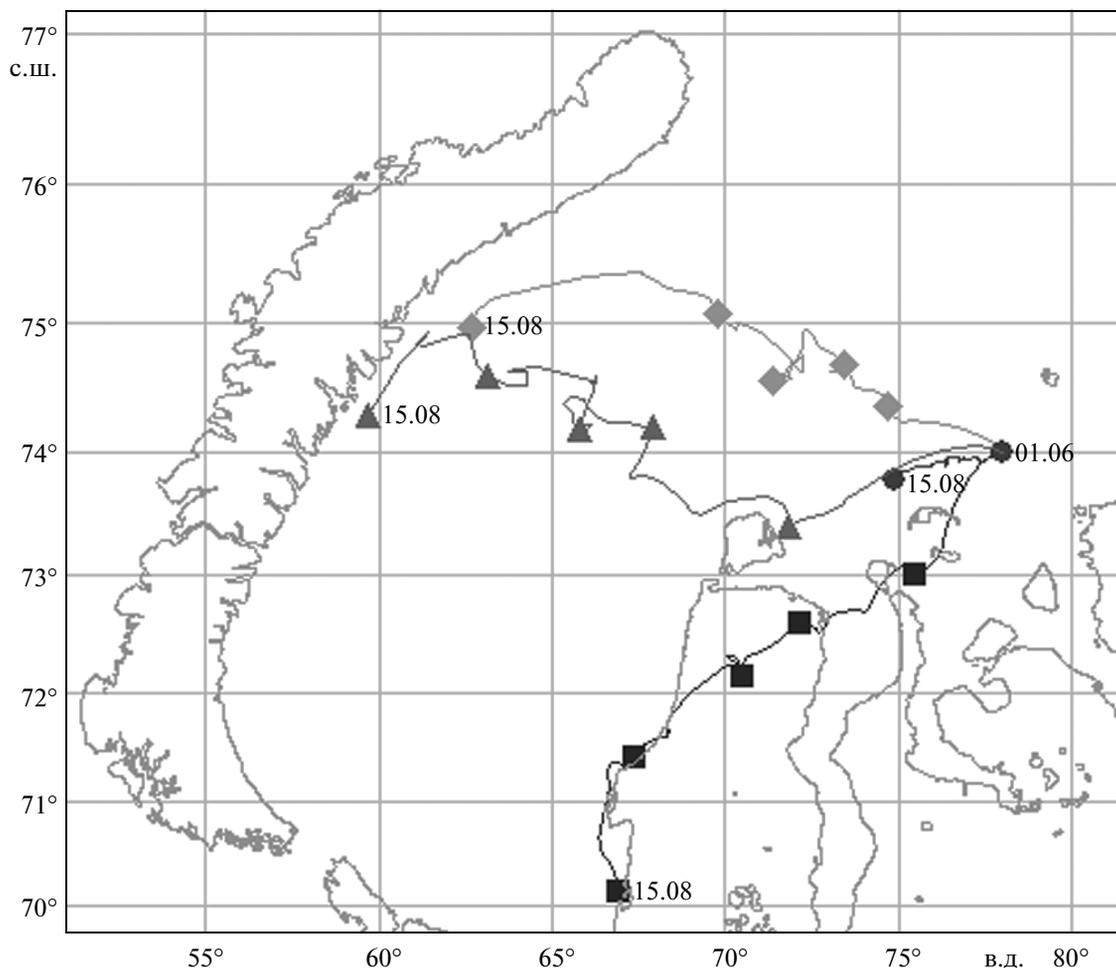
пробный расчет проводился при толщине опресненного слоя, равной  $h = 3$  м, что при среднем для лета 2007 г. в Карском море значении скорости трения  $u_* = 5.5 \times 10^{-3}$  м/с [2] и  $f = 1.4 \times 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> соответствует не слишком большому значению числа Экмана  $E = 5.2$  (подробнее о приведении решения, полученного в [10], к безразмерному виду (6)–(7) см. [1]).

4. Модель, учитывающая эффект стратификации с применением результатов моделирования эволюции опресненного слоя, представленных в работе [1]. Предполагалось учесть 2 главных эффекта воздействия опресненного слоя на ветровой дрейф, выявленных в [1]: увеличение модуля скорости дрейфового течения в 1.4–2.6 раза и разворот течения вправо на величину до  $50^\circ$  относительно “невозмущенного состояния” (в отсутствие стратификации). Поэтому было принято решение провести тестовый расчет со скоростью дрейфа  $V_S$  по формуле (5) с множителем 1.5 и разворотом течения  $\varphi_S = -50^\circ$  вместо  $\varphi_S \approx -10^\circ$  в модели Медсена [9].

Результаты расчета траекторий лагранжевой частицы по четырем вышеописанным алгоритмам приведены на рис. 2.

Вариант расчета с классическим экмановским дрейфом предсказал перенос частицы на запад менее чем на 100 км от начальной точки за период до середины августа (когда доминировал северный ветер). Вариант расчета по модели Медсена [9] показал смещение частицы на расстояние около 600 км за период с 1 июня до 15 августа, но направление движения было на юго-запад, а не к островам Новая Земля, где была обнаружена линза. Как видно из рис. 2, часть траектории расчета по данной модели проходит по суше (пересекает полуостров Ямал); эта особенность является следствием того, что в предложенной постановке задачи ветрового дрейфа наличие твердых границ не учитывается. Таким образом, оба алгоритма расчета дрейфового течения без учета эффекта опресненного верхнего слоя не обеспечивают соответствия наблюдениям.

Существенно иной результат дали расчеты по алгоритмам 3 и 4, учитывающим влияние опресненного слоя на ветровой дрейф. За период времени с 1 июня до 15 августа 2007 г. оба этих алгоритма воспроизвели западный перенос с приближением лагранжевой частицы к побережью островов Новая Земля и попаданием ее именно в то место, где наблюдалась линза енисейской воды. Таким образом, локализация линзы материковых вод, наблюдавшейся в начале осени 2007 г. у восточного побережья островов Новая Земля между  $74^\circ$  и  $76^\circ$  с.ш., действительно может быть объяснена переносом опресненного слоя ветро-



**Рис. 2.** Траектории лагранжевой частицы, рассчитанные по различным моделям ветрового дрейфа. Положения частицы с 15-дневными интервалами представлены: кругами – классическая экмановская модель ветрового дрейфа [6]; черными квадратами – модель Медсена [9]; серыми квадратами, повернутыми на 45° (ромбами) – модель Прайса и Сандермейера [10]; треугольниками – модель, учитывающая эффекты наличия опресненного приповерхностного слоя моря, выявленные в работе [1]. Цифры указывают дату (число и месяц в 2007 г.).

выми дрейфовыми течениями с учетом влияния стратификации на скорость и направление ветра.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным результатом выполненных численных экспериментов можно считать вывод о том, что при расчете переноса материкового стока в море крайне существенным является адекватный учет влияния создаваемой стоком стратификации в приповерхностном слое на скорость и направление ветрового дрейфа. Физический смысл такого влияния понятен: воды речного происхождения создают у поверхности выраженный опресненный слой, турбулентный обмен на нижней границе которого ограничен из-за наличия там устойчивого скачка плотности. Поэтому практически вся энергия, переданная ветром, приходится на этот относительно тонкий слой, который

вследствие этого и приобретает более высокую скорость, чем в условиях отсутствия стратификации, когда та же энергия распределялась бы по всей водной толще. Таким образом, классические соотношения Экмана, полученные в предположении о постоянстве коэффициента турбулентной вязкости по вертикальной координате и бесконечной глубине океана, должны в этом случае приводить к существенному занижению оценки скорости дрейфа, что и отмечено в наших расчетах (численный эксперимент 1). Не улучшают ситуацию и попытки включить в рассмотрение некую непрерывную зависимость коэффициента вязкости от глубины, как в модели Медсена [9] (численный эксперимент 2). Вместе с этим, явный учет присутствия опресненного приповерхностного слоя, как по модели Прайса и Сандермейера [10], так и по нашей модели [1] приводит к удовлетворительным результатам.

Расчеты по алгоритмам, учитывающим эффект стратификации плотности, создаваемой опресненным слоем, показали хорошее соответствие времени переноса и места нахождения лагранжевых частиц, полученных из модельных расчетов, и реальным времени и месту наблюдения линзы вод речного происхождения у восточного побережья островов Новая Земля между 74° и 76° с.ш. во время проведения экспедиции в Карское море на НИС “Академик Мстислав Келдыш” в начале осени 2007 г.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 14-50-00095).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Журбас Н.В.* О скорости ветрового дрейфа распресненного слоя на поверхности моря // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 2. С. 157–166.
2. *Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др.* Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 656–667.
3. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Кубряков А.А. и др.* Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 5. С. 1–12.
4. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965. Ч. 1. 639 с.
5. *Cushman–Roisin B.* Introduction to Geophysical Fluid Dynamics. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1994. 320 p.
6. *Ekman V.W.* On the influence of the Earth’s rotation on ocean currents // *Archive Math. Astron. Phys.* 1905. V. 2. № 11. P. 1–52.
7. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. V. 77. № 3. P. 437–471.
8. *Large W.G., Pond S.* Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. V. 11. № 3. P. 324–336.
9. *Madsen O.S.* A realistic model of the wind-induced Ekman boundary layer // *J. Phys. Oceanogr.* 1977. V. 7. № 2. P. 248–255.
10. *Price J.F., Sundermeyer M.A.* Stratified Ekman layers // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № C9. P. 20,467–20,494.
11. *Smith J.E.* Torrey Canyon Pollution and Marine Life // Cambridge University Press. 1968. 196 p.
12. *Stacey M.W., Pond S., LeBlond P.H.* A wind-forced Ekman spiral as a good statistical fit to low-frequency currents in coastal strait // *Science*. 1986. V. 233. P. 470–472.

## Application of Wind Drift Models to River Runoff Transport in the Kara Sea

N. V. Zhurbas, P. O. Zavialov

The possibility of formation of the Yenisei and Ob Rivers floodwater lens, observed in September–October 2007 in the Kara Sea nearby the eastern coast of the Novaya Zemlya, by the wind drift is examined. The numerical calculations of trajectories of Lagrangian floats, launched on the north part of the Yenisei and Ob sea-side mouth and transported by drift currents, are performed using the real wind forcing data. Four different algorithms of calculations of the surface drift velocity and angle relatively to the wind direction are used; two of the algorithms account for the effect of density stratification due to the presence of the fresh water layer at the sea surface. It is shown that only the wind drift models that take into account the presence of stratification are able to provide transport of the Yenisei and Ob floodwater to the point of detection of the lens.