

УДК 551.46.062.8(265.53)

**И.И. Усольцев<sup>1</sup>, Т.Р. Кильматов<sup>1,2</sup>, А.Н. Вражкин<sup>3\*</sup>**

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет,  
690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10;

<sup>2</sup> Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а;

<sup>3</sup> Дальневосточный региональный научно-исследовательский  
гидрометеорологический институт,  
690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24

## **АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ОХОТСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДРЕЙФОМ БУЕВ**

Представлены данные натурных наблюдений дрейфа буев в западной части Охотского моря. Выделяется квазистохастический режим движения при воздействии атмосферного циклона. Проводится совместный анализ дрейфа с полем ветра, данными спутниковой альтиметрии. Показано, что прогноз траектории дрейфа плавающих объектов нужно осуществлять совместным учетом ветрового поля и геострофической составляющей поверхностного течения. Представлены модельные траектории дрейфа с отдельным влиянием геострофической и дрейфовой составляющих.

**Ключевые слова:** дрейф, поверхностные течения, Охотское море, приводный ветер, спутниковая альтиметрия.

**Usoltsev I.I., Kilmatov T.R., Vrazhkin A.N.** Analysis and forecast of the surface currents in the Okhotsk Sea on the base of observations on drift of buoys // *Izv. TINRO.* — 2017. — Vol. 189. — P. 131–138.

Data of observations on drifting buoys in the western Okhotsk Sea are presented. Quasi-stochastic mode of the buoys drift under forcing of atmospheric cyclone is noted. The drift is analyzed jointly with analysis of the wind field and the sea surface satellite altimetry. The buoy drift trajectories are modeled under separate influence of the wind-driven and geostrophic flows. There is concluded that both wind-driven and geostrophic currents at the sea surface should be accounted for forecasting of drift for buoys or any floating objects.

**Key words:** drift, surface current, Okhotsk Sea, wind field, satellite altimetry.

### **Введение**

Многообразие взаимодействующих факторов, формирующих поверхностные течения в море, — ветер, суммарное действие дрейфовых, геострофических, при-

---

\* Усольцев Игорь Игоревич, аспирант, e-mail: garry-tagil@yandex.ru; Кильматов Талгат Рустемович, доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: talgat\_k@mail.ru; Вражкин Александр Николаевич, кандидат технических наук, заведующий отделом, e-mail: van@ferhri.ru.

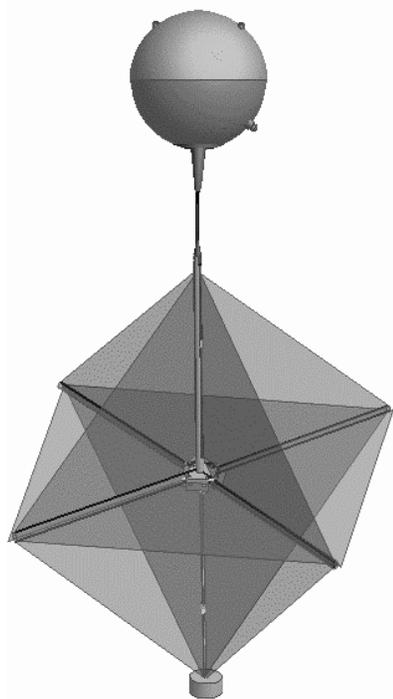
Usoltsev Igor I., post-graduate student, e-mail: garry-tagil@yandex.ru; Kilmatov Talgat R., D.Sc., professor, e-mail: talgat\_k@mail.ru; Vrazhkin Aleksander N., Ph.D., head of department, e-mail: van@ferhri.ru.

ливных течений — осложняет однозначные прогнозы по определению координат объектов, свободно плавающих на поверхности моря (Филлипс, 1980). Это особенно актуально для районов, находящихся рядом с местами нефтедобычи на шельфе, для прогноза зоны загрязнения вследствие потенциальной возможности разлива нефти. Вследствие прикладной важности этих параметров в настоящее время проводятся натурные эксперименты в море по переносу разных объектов и модельные исследования, в частности, экспериментальные и теоретические работы по дрейфу (Саркисян и др., 2005; Становой и др., 2007; Пранц и др., 2011). В целом отметим, что задача прогноза положения свободнодрейфующих объектов еще не решена.

Целью настоящей работы является анализ и прогноз дрейфа объектов на поверхности Охотского моря вследствие ветровой и геострофической составляющих течений.

### Материалы и методы

Сбор данных натурных экспериментов по дрейфу буюв на поверхности Охотского моря проведен в ДВНИГМИ (Рейс № 13, судно «Профессор Мультановский», август 2013 г.) с буюми типа «SVP-Marlin» (<http://www.marlin-yug.com>), внешний вид буюа и характерные линейные размеры представлены на рис. 1.



Это стеклопластиковая сфера с подводным парусом типа «Тристар», с центром давления паруса на глубине 1 м и коэффициентом отношения площади паруса к площади буюа 40 : 1. В работе анализируется характерный буй для летнего периода в рассматриваемом регионе, в данном случае с 1 по 28 августа 2013 г.

Рис. 1. Внешний вид буюа «SVP-Marlin» со спутниковой системой «Argos». Диаметр сферы на поверхности моря 34 см, подводный парус с крылом 1 м

Fig. 1. External view of the buoy SVP-Marlin with the satellite system Argos. The sphere diameter on the sea surface is 34 cm, size of the underwater sail is 1 m

В статье использовались данные спутниковой альтиметрии и геострофических скоростей из информационного ресурса Live Access Server (<http://las.aviso.oceanobs.com/>), сетка по пространству 25 мин, шаг по времени 24 ч. Карты полей давления над исследуемой акваторией, как и данные реанализа приводного ветра, были взяты из материалов Японского метеорологического агентства (<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>), разрешение по пространству 0,5 град (сетка Охотского моря 254 x 93), шаг по времени 6 ч. Время и место наблюдений соответствуют положению дрейфа дрейфтера. Общая климатическая обстановка и общие данные по приливам в Охотском море взяты из океанографического атласа по Охотскому морю ([http://www.pacificinfo.ru/data/cdrom/2/HTML/1\\_00.htm](http://www.pacificinfo.ru/data/cdrom/2/HTML/1_00.htm)). Модельные данные по течениям использовались из национального центра исследования окружающей среды США (NCEP <http://www.ncep.noaa.gov/>).

Проведены модельные расчеты траекторий движения буюа по модифицированной (с учетом геострофической поправки) полуэмпирической модели свободнодрейфующего тела «Leeway» (<https://zenodo.org/record/797/files/12152.pdf>).

## Результаты и их обсуждение

Траектория дрейфа буя представлена на рис. 2. Начальные координаты траектории на 01.08.2013 г. соответствуют координатам  $52,865^{\circ}$  с.ш.  $144,804^{\circ}$  в.д. Это рядом с северо-восточным шельфом о. Сахалин, на котором осуществляется добыча нефти и газа.

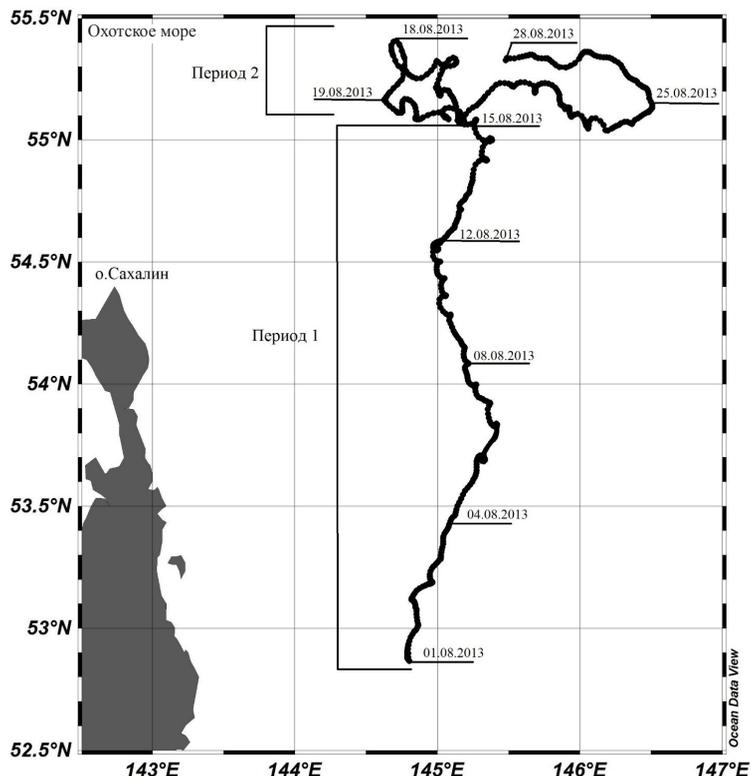


Рис. 2. Траектория и положение буя «SVP-Marlin» по датам: *период 1* (01–15.08.2013 г.) — упорядоченное движение буя с генеральным направлением на север; *период 2* (16–28.08.2013 г.) — «хаотическая» траектория

Fig. 2. Trajectory and coordinates of the buoy SVP-Marlin, by dates: *section 1* (August 01–15, 2013) — north-oriented movement; *section 2* (August 16–28, 2013) — chaotic movement

На рис. 2 видно, что дрейф буя нами условно разделен на два периода. Первый период (П1), с 1 по 15 августа, можно описать как упорядоченное движение с преобладающим северным направлением. Второму периоду (П2), с 16 по 28 августа, свойствен квазихаотический характер траектории севернее точки начала дрейфа. В данном случае не важна конечная координата точки буя 28.08.2013 г., так как в режиме движения в П2 достаточно определить границы акватории, в которую попадет дрейфующий объект и будет совершать хаотические перемещения.

Перечислим и оценим различные факторы, влияющие на траекторию движения буя. Это прежде всего крупномасштабные, синоптические, приливные течения на поверхности Охотского моря (Лучин, 1987; Верхунов, 1997; Дарницкий, Лучин, 1997; Preller, Hogan, 1998). Общее климатическое поле поверхностных течений характеризуется циклонической системой циркуляции, обходящей береговую линию моря против часовой стрелки. В частности, генеральная климатическая циркуляция восточнее северной части о. Сахалин направлена на юг — это устойчивое Восточно-Сахалинское течение. Отметим, что результаты наблюдений за дрейфом буя не соответствуют схеме общей циркуляции моря, буй движется против Восточно-Сахалинского течения. Это несоответствие можно объяснить тем, что большое количество иных факторов — атмосферная циркуляция, океанические течения, проходящие через Курильскую гряду, приливы, рельеф дна, в частности банка Кашеварова, — могут деформировать крупномасштабную циркуляцию в данный конкретный интервал вре-

мени. Например, вполне допустимо, что буй попал в струю Восточно-Сахалинского противотечения. Общая циркуляция, которая в значительной степени определяется геострофической составляющей, в работе обсуждается ниже.

Влияние приливов на дрейф в открытой части Охотского моря ограничено вследствие того, что здесь они имеют порядок скорости 5–10 см/с. Данные наблюдений за дрейфом буя показывают, что в нашем эксперименте этот эффект незначителен. Это также связано с тем, что тип обсуждаемого приливного движения вращательно-реверсивный, среднее перемещение буя вследствие данного эффекта в открытой части моря усредняется и компенсируется, поэтому им можно пренебречь. Эффектом прилива нельзя пренебрегать в проливах и вблизи берегов, где скорость достигает 300 см/с.

На синоптическом масштабе наблюдается значительная нестационарность, которая может менять схему течений на противоположную. В частности, В.Д. Будаевой с соавторами (1980) и В.М. Пищальником и В.С. Архипкиным (1999) в прол. Лаперуза и на северо-восточном шельфе о. Сахалин построены одинаковые вихревые образования, имеющие противоположные вращения. Прохождение атмосферных циклонов-антициклонов накладывает на поле поверхностных течений поле более мелких возмущений. Это квазистационарные вихревые образования и меандры течений. В районе Курильской котловины обычно наблюдаются 2–4 антициклонических вихря диаметром 100–150 км. Данные представленного эксперимента показывают, что именно синоптическая ситуация несет наибольшую ответственность за направление дрейфа буя.

Таким образом, различие в траекториях П1 и П2 вполне может быть спровоцировано изменением синоптической ситуации в атмосфере над рассматриваемой акваторией. В то же время это не исключает наличия синоптических вихрей в акватории П2, в том числе продуцированных банкой Кашеварова.

Рассмотрим влияние ветра на движение буя, поскольку именно дрейфовая составляющая в большей степени формирует поверхностное поле течений. С 16 августа буй попал под действие атмосферного циклона и движение в этот период имело генеральное направление на север — северо-восток, т.е. довольно близко по направлению ветра. Анализ зависимости угла между направлением дрейфа и направлением ветра в зависимости от отношения модулей скоростей буя к ветру представлен на рис. 3.

Интересно отметить, что в периоды 1 и 2 дрейф буя по типу был принципиально разным, хотя отклонения по периодам были непринципиальны. В то же время, судя по рис. 3, не установлено классического результата экмановской модели дрейфа, т.е. отклонения поверхностного течения (в нашем случае дрейфа) вправо от направления ветра. Отметим, что угол отсчитывался как отклонение по компасу вправо. Главное в типах движения буя в П1 и П2 — то, что значимой корреляционной зависимости между обсуждаемыми характеристиками не наблюдается, хотя буй в большой степени повторяет движение ветра, по крайней мере в П1. В целом идеальные условия, при которых построена модель Экмана, выполняются в данном реальном эксперименте слабо (Шулейкин, 1966).

Рассмотрим влияние геострофической компоненты поверхностной скорости течения на движение буя. Эта компонента довольно консервативна во времени и в большой степени определяет генеральную климатическую циркуляцию. В настоящее время есть возможность использовать массовые виды наблюдений — спутниковые альтиметрические поля, в частности Las Aviso, которые являются результатом интегрального геострофического эффекта. На данном ресурсе представлены также модельные геострофические расчеты скорости течения на поверхности моря, хотя эти данные между собой связаны классическими геострофическими соотношениями (в работе были опробованы оба поля):

$$\begin{aligned} V_g f &= -\frac{1}{g\rho} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta x} \approx -g \frac{\Delta\alpha}{\Delta x}, \\ -U_g f &= -\frac{1}{g\rho} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta y} \approx -g \frac{\Delta\alpha}{\Delta y}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V_g$  и  $U_g$  — геострофические компоненты скорости течений соответственно на восток и север;  $f_g$  — параметр Кориолиса;  $\rho$  — плотность воздуха;  $g$  — ускорение свободного

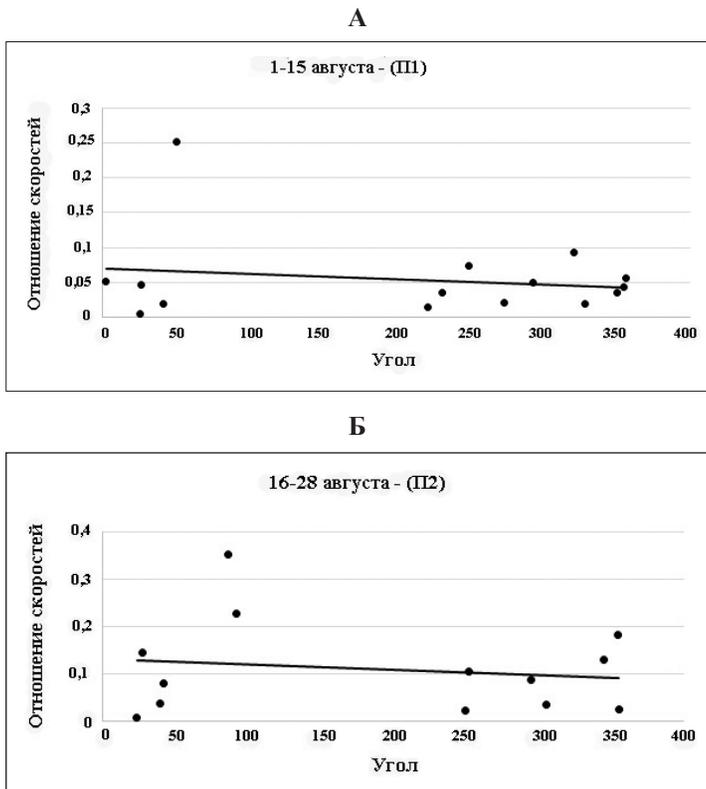


Рис. 3. Зависимость отношения модулей скоростей буйа и приводного ветра от угла между векторами: **А** — период движения с генеральным дрейфом на север; **Б** — период «хаотического» перемещения буйа

Fig. 3. Module ratio of the buoy velocity to wind speed dependence on the angle between the vectors: **A** — north-oriented movement (section 1 at Fig. 2); **B** — chaotic movement (section 2 at Fig. 2)

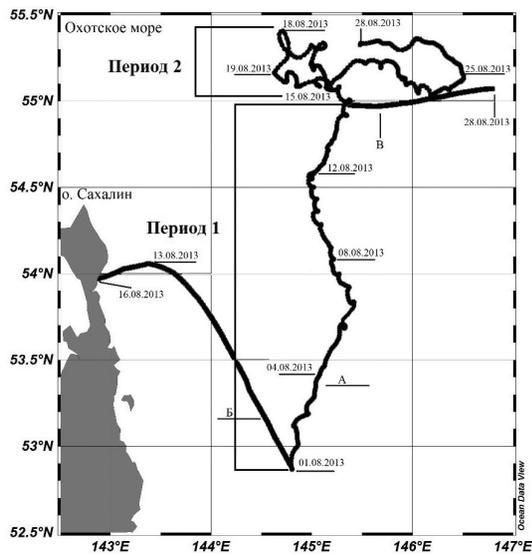
падения;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  — шаги сетки соответственно на восток и север;  $\alpha(x, y)$  — поле уровня поверхности со спутниковых альтиметрических наблюдений.

Реализовано два эксперимента. Первый — буй запускался из начальной точки в П1 и двигался в поле геострофических течений. На рис. 4 видно, что объект за 16 дней резко уходил на запад и упирался в берег о. Сахалин. Во втором эксперименте за начальную точку использовалось положение буйа на 16.08.2013 г., т.е. движение в П2. Буй в этом случае монотонно под действием геострофического течения перемещался на восток, хаотическое движение отсутствовало. Таким образом, геострофическая составляющая определяет только фон, реальное перемещение объекта в данном случае больше соответствует дрейфовой составляющей.

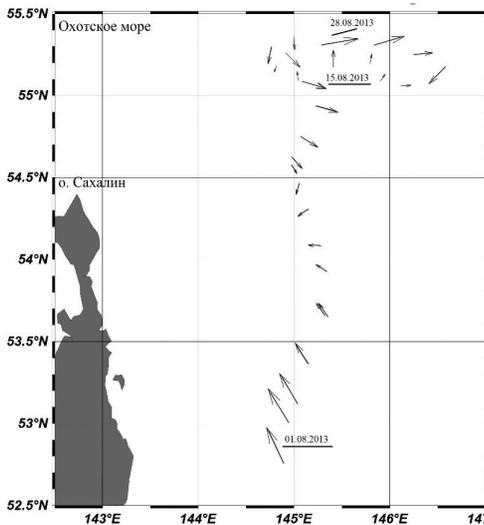
В настоящее время существует множество численных и полуэмпирических моделей для расчета поверхностных течений в различных акваториях (Marchuk et al., 2001; Залесный и др., 2007). В нашей работе проведены модельные эксперименты по полуэмпирической модели-дрейфа «Leeway» (<https://zenodo.org/record/797/files/12152.pdf>). Суть модели — дрейф буйа пропорционален скорости ветра, коэффициенты пропорциональности подбираются экспериментально. Структура расчетной формулы имеет вид

$$\begin{aligned}
 L_d &= a_d W + b_d + e_d, \\
 L_{c+} &= a_{c+} W + b_{c+} + e_{c+}, \\
 L_{c-} &= a_{c-} W + b_{c-} + e_{c-},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $L_d$ ,  $L_{c+}$ ,  $L_{c-}$  — компоненты скорости движения модельного буйа соответственно по ветру, перпендикулярного отклонения вправо (+) и влево (–) от направления ветра;



А



Б

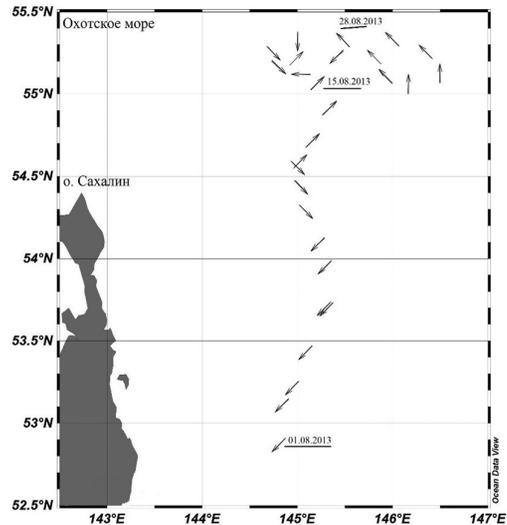


Рис. 4. Сравнение движения реального (А) и модельного (Б) буйев, движущихся по геострофической траектории: **слева** — поле геострофического течения; **справа** — поле наклона урovenной поверхности моря вдоль траектории движения буйа

Fig. 4. Comparison of the real (А) and modeled (Б) geostrophic movement of the buoy. **Left** panel: field of geostrophic currents; **right** panel: the sea surface slope along the buoy trajectory

$W$  — скорость ветра в приводном слое;  $a_d, b_d, e_d, a_c, b_c, e_c$  — эмпирические параметры, зависящие от формы объекта.

В работе модель модифицировалась — дополнительно учитывалась поверхностная геострофическая составляющая скорости.

Характерный результат модельного дрейфа (по усовершенствованной модели «Leeway») представлен на рис. 5. Движение модельной траектории на север более ограничено, чем реальной. Характер движения в П1 и П2 повторяется, хотя акватория в П2 модельного квазихаотического движения расположена южнее. На рис. 5 видно, что в соответствии с расчетами геострофической составляющей движения буйа учет этого фактора приводит к смещению траектории на запад ближе к о. Сахалин в период 1, как видно на рис. 4. Соответственно, в период 2 геострофическая составляющая смещает буй на восток.

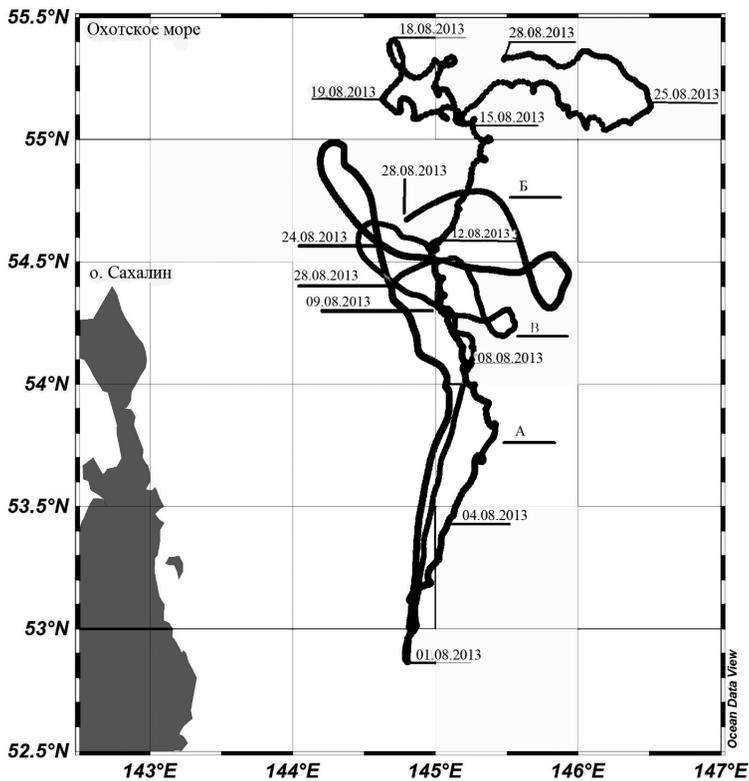


Рис. 5. Результаты моделирования движения буя по модифицированной модели: *A* — реальная траектория; *B* и *B* — модельные траектории. Модельные траектории остаются южнее реальной

Fig. 5. Results of the buoy movement modeling using the modified model: *A* — real track; *B* and *B* — modeled tracks (the modeled tracks lay to the south of the real track)

## Выводы

В рамках данного исследования установлено следующее.

Прогноз положения свободнодрейфующего объекта в море связан с конкретной акваторией, ее климатическими и синоптическими особенностями, влияющими на поле поверхностного течения.

При стандартных морских условиях для буя, имеющего доминирующую подводную парусность, определяющим фактором является дрейфовая составляющая течения.

Геострофическая составляющая поверхностного течения, которую в современных условиях просто оценить по альтиметрическим спутниковым наблюдениям, может уточнить дрейф объекта. Хотя эта составляющая не стала определяющей в нашем эксперименте, ясно, что в ряде акваторий (Куросио) этот фактор будет решающим.

Анализ углов направления ветра и дрейфа буя в открытом море в данном эксперименте не позволил подтвердить классическую теорию Экмана об отклонении вправо вектора скорости поверхностного течения.

Даже кратковременные синоптические воздействия могут сильно сместить положение дрейфующего объекта, его движение в рассматриваемом случае приняло квазистохастический характер, поэтому подобные ситуации целесообразно учитывать при предсказании положения объекта, чтобы указать наиболее вероятную акваторию поиска.

## Список литературы

Будаева В.Д., Макаров В.Г., Мельникова И.Ю. Диагностические расчеты стационарных течений в заливе Анива и проливе Лаперуза // Тр. ДВНИГМИ. — 1980. — Вып. 87. — С. 66–78.

- Верхунов А.В.** Развитие представлений о крупномасштабной циркуляции Охотского моря // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. — М. : ВНИРО, 1997. — С. 8–18.
- Дарницкий В.Б., Лучин В.А.** Особенности горизонтальной структуры климатических течений Охотского моря с месячной дискретностью // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. — М. : ВНИРО, 1997. — С. 19–25.
- Залесный В.Б., Дианский Н.А., Конторовский С.В.** Численное моделирование динамики вод Охотского моря // Дальневосточные моря России. Книга 1. — М. : Наука, 2007. — С. 335–387.
- Лучин В.А.** Циркуляция вод Охотского моря и особенности ее внутригодовой изменчивости по результатам диагностических расчетов // Тр. ДВНИГМИ. — 1987. — Вып. 36. — С. 3–13.
- Пищальник В.М., Архипкин В.С.** Сезонные вариации циркуляции вод на охотоморском шельфе острова Сахалин // Гидрометеорологические и экологические условия дальневосточных морей: оценка воздействия на морскую среду : Тр. ДВНИГМИ. — 1999. — Темат. вып. № 2. — С. 84–95.
- Пранц С.В., Улейский М.Ю., Будянский М.В.** Численное моделирование распространения в океане радиоактивного загрязнения от АЭС «Фукусима-Дайичи» // ДАН. — 2011. — Т. 439, № 6. — С. 811–814.
- Саркисян А.С., Залесный В.Б., Дианский Н.А. и др.** Математические модели циркуляции океанов и морей // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. — М. : Наука, 2005. — Т. 2 : Математическое моделирование. — С. 176–278.
- Становой В.В., Лавренов И.В., Неелов И.А.** Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2007. — Вып. 77. — С. 7–16.
- Филлипс О.М.** Динамика верхнего слоя океана : моногр. — Л. : Гидрометеиздат, 1980. — 320 с.
- Шулейкин В.В.** Возникновение и распространение морских течений при участии сил трения // Физика моря. — 1966. — Ч. 2. — С. 27–38.
- Marchuk G.I., Shutyaev V., Zalesny V.B.** Mathematical modelling of marine and oceanic currents // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modell. — 2001. — Vol. 16, № 4. — P. 331–362.
- Preller R.H., Hogan P.J.** Oceanography of the sea of Okhotsk and the Sea of Japan/East sea // The sea. — N.Y. : Wiley, 1998. — Vol. 11. — P. 429–449.

*Поступила в редакцию 20.12.16 г.*

*Принята в печать 27.01.17 г.*