

В.А. ДУБИНА, И.О. КАТИН

## Особенности трансграничного переноса поверхностных вод в северо-западной части Японского моря по многолетним спутниковым наблюдениям

*Анализ архива спутниковых наблюдений за последние 33 года и многолетние наземные наблюдения за местами скопления и временем появления плавающего мусора на островах зал. Петра Великого свидетельствуют о том, что трансграничный перенос вод в российский сектор северо-западной части Японского моря определяется межгодовой, сезонной и синоптической изменчивостью поверхностной циркуляции, напрямую не зависит от ветра и происходит во все сезоны. Северо-восточное течение сопровождается образованием мезомасштабных циклонических вихрей, которые обуславливают интенсивное вертикальное и горизонтальное перемешивание в зал. Петра Великого.*

*Ключевые слова: северо-западная часть Японского моря, зал. Петра Великого, трансграничный перенос, Landsat, MODIS, мезомасштабные вихри.*

**Transboundary transfer features in the northwestern part of the Japan Sea based on the multiyear satellite imagery.** V.A. DUBINA (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok; Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok), I.O. KATIN (National Scientific Center of Marine Biology, FEB RAS, Vladivostok).

*The analysis of the archive of the satellite measurements for the last 33 years and ground observations of the places and repeatability of flotsam appearance on the Peter the Great Bay islands indicate that transboundary transfer to the Russian waters in the northwestern part of the Japan Sea is governed by interannual, seasonal and synoptic variability of the surface circulation, does not directly depend on the winter conditions and takes place in all seasons. The northeastern current is accompanied with mesoscale cyclonic eddies, which induce intensive vertical and horizontal mixing in the Peter the Great Bay.*

*Key words: northwestern part of the Japan Sea, Peter the Great Bay, transboundary transfer, Landsat, MODIS, mesoscale eddies.*

В северо-западном районе Японского моря, включающем зал. Петра Великого (ЗПВ), по многолетним инструментальным наблюдениям доминирует холодное Приморское течение, которое следует на юго-запад вдоль кромки шельфа и имеет максимум скорости на горизонте около 100 м. В районе ЗПВ течение смещается в сторону мелководья на глубины менее 100 м, а его ядро поднимается до глубин 5–25 м [10]. Благодаря муссонам скорость Приморского течения в среднем возрастает зимой и ослабевает летом,

---

\*ДУБИНА Вячеслав Анатольевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток), доцент (Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток), КАТИН Игорь Олегович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник (Национальный научный центр морской биологии ДВО РАН, Владивосток). \*E-mail: dubina@poi.dvo.ru

Работа выполнена при поддержке проекта 18-1-010 Комплексной программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН «Дальний Восток».

но в районе ЗПВ в поверхностном слое оно прослеживается в течение всего года с одинаковыми скоростями примерно 0,2–0,3 м/с [10].

Подписание в декабре 1995 г. пятью государствами соглашения «О содействии экономическому развитию бассейна реки Туманган» инициировало проведение комплексных научно-исследовательских работ в юго-западной части зал. Петра Великого, главной целью которых являлось определение концентрации загрязняющих веществ и путей их перемещения в районе, прилегающем к устью р. Туманная. В последующие 3 года был собран, обработан и систематизирован большой объем архивной и новой информации о структуре и состоянии морских экосистем в данном районе, исследованы пространственно-временные особенности гидрологического и гидрохимического режима вод, распределения загрязняющих веществ и пр. [1–3, 8, 11]. На основании выполненных гидрологических и микробиологических исследований было сделано заключение, что юго-восточная часть ЗПВ находится под влиянием стока р. Туманная. Причиной влияния является перенос в данном районе водных масс в поверхностном слое на север. По мнению исследователей, это течение возникает под действием южных и юго-западных ветров в теплый период года, проходит недалеко от берега в районе устья р. Туманная в сторону о-ва Фуругельма и дальше вглубь зал. Посьета [2, 3, 8].

Основными недостатками выполненных работ были пространственная и временная ограниченность наблюдений и неиспользование спутниковой информации. Принимая во внимание размеры и положение района исследований, выводы о трансграничном загрязнении можно было делать только в контексте переноса загрязняющих веществ с территорий КНДР и КНР по р. Туманная и влияния этого стока на юго-западную часть ЗПВ в летний период.

Благодаря речному стоку и значительным градиентам температуры структура приповерхностных течений в исследуемом районе хорошо прослеживается на спутниковых изображениях в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах электромагнитного спектра. В работе [9] приведены результаты анализа спутниковых снимков, на основе которых делается заключение об эпизодическом возникновении трансграничного переноса поверхностных вод в ЗПВ по периферии синоптических антициклонических вихрей в марте–октябре. Характеризуя эти антициклоны, авторы отмечают, что они могут существовать 6–8 мес., но их положение и конфигурация меняются в течение нескольких суток–недель, поэтому обусловленные ими северо-восточные течения в юго-западной части ЗПВ «носят эпизодический характер» [9]. Исследование базировалось на спутниковых ИК-изображениях, имеющих пространственное разрешение более 1 км.

В работе [4] анализируются результаты численного моделирования, которые показали наличие в сентябре–ноябре северо-восточного потока через границу территориальных вод Российской Федерации. Ветер в этот интервал интегрирования принимал как южные, так и северные направления. По данным моделирования трансграничное течение в районе устья р. Туманная прилегает к берегу, имеет ширину до 20 км и максимальные скорости до 0,15 м/с. Эти результаты были проиллюстрированы спутниковыми изображениями высокого и среднего пространственного разрешения (30–250 м), полученными в разные годы в период с конца августа до начала ноября. На этих снимках зарегистрирован северо-восточный перенос вод в юго-западной части ЗПВ в виде струйного течения, по периферии стационарных синоптических антициклонов сопровождающегося образованием нестационарных мезомасштабных вихрей [4].

В настоящей работе приводятся результаты исследования, основанного на анализе архива изображений, полученных со спутников серии Landsat (1984–2018 гг.), и изображений спектрорадиометров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua (2000–2018 гг.). Выводы подкреплены визуальными наблюдениями на островах зал. Петра Великого.

*Сток р. Туманная на изображениях, полученных в видимом диапазоне спектра*

Сток реки отчетливо виден на изображениях, полученных в видимом диапазоне спектра спектрорадиометрами MODIS со спутников Terra и Aqua, а также на снимках со

спутников серии Landsat в поле цвета (мутности) воды в теплый период года. На рис. 1 приведены изображения MODIS, принятые в разные годы главным образом во время паводков р. Туманная. Обычно сток рек в Северном полушарии под влиянием силы Кориолиса направлен на юг вдоль берега. Сток р. Туманная в «классическом» виде на юго-запад показан на примере изображения от 6 августа 2012 г. (рис. 1). Но очень часто поток речных вод в данном районе направлен в противоположную сторону – на восток-северо-восток. Данное обстоятельство известно давно и отмечено в лоции: «полоса мутной желтоватой

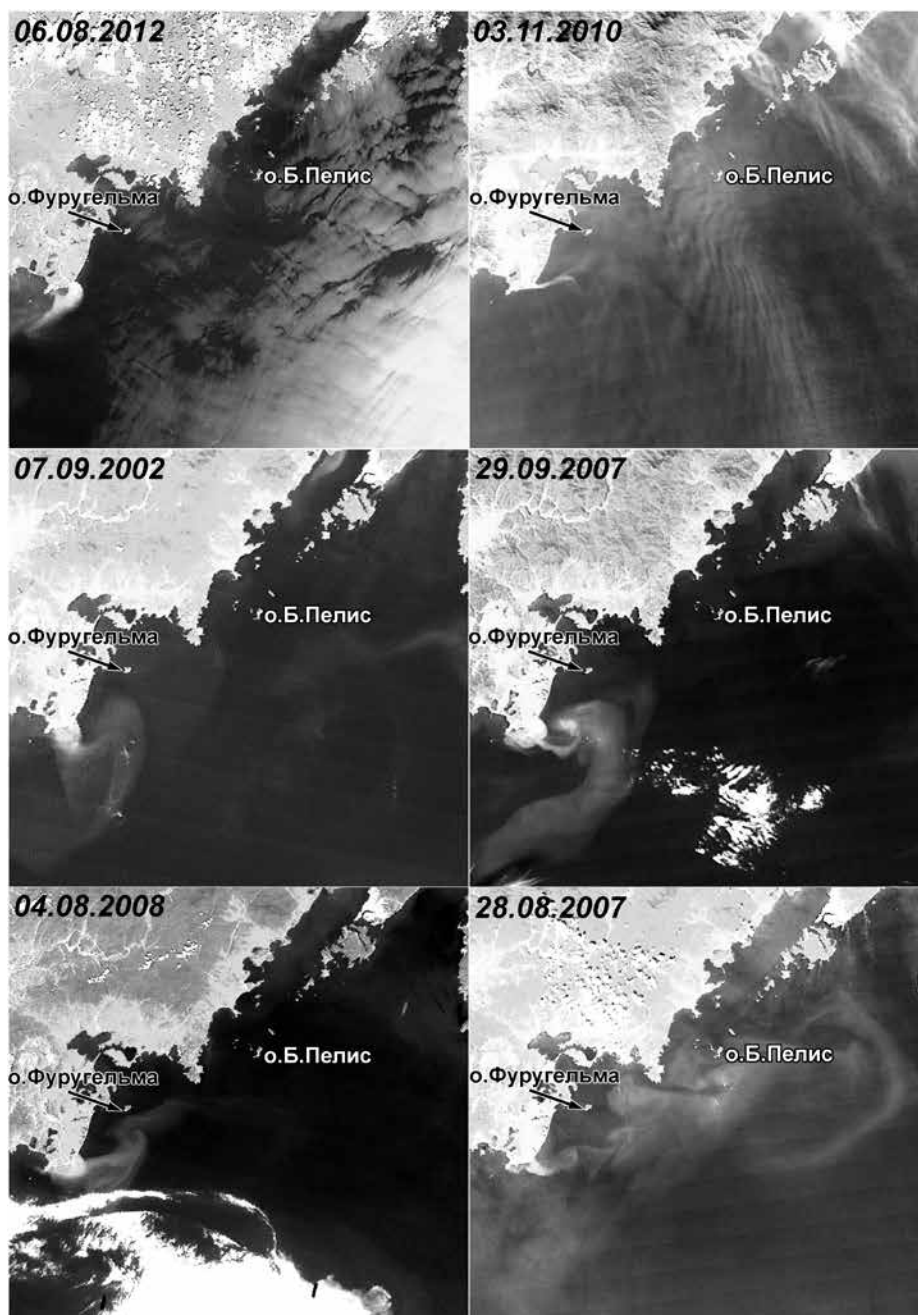


Рис. 1. Сток р. Туманная на изображениях, полученных в видимом диапазоне электромагнитного спектра спектрорадиометрами MODIS

воды простирается на 5–6 миль от устья. Летом эта полоса тянется обычно на ENE от устья, но направление ее может быть и другим в зависимости от направления течения» [7].

Сток р. Туманная может выглядеть как прямолинейная струя длиной 20–30 км (3 ноября 2010 г., рис. 1). Но чаще всего поток речных вод вовлекается в вихревые движения. Это может быть либо один циклонический вихрь диаметром 10–15 км, который располагается к югу от о-ва Фуругельма (7 сентября 2002 г., 29 сентября 2007 г. и 4 августа 2008 г., рис. 1), либо цепочка вихрей, диаметры которых увеличиваются по мере удаления от устья реки (28 августа 2007 г., рис. 1). Чаще всего одиночный циклон южнее о-ва Фуругельма образуется при смене течения южных румбов на поток противоположного направления (7 сентября 2002 г. и 29 сентября 2007 г., рис. 1).

При образовании вихревой цепочки мезомасштабные циклоны диаметром около 3 км с суточным периодом генерируются возле устья р. Туманная и, увеличиваясь в диаметре до 8–10 км, смещаются со скоростью 0,2–0,3 м/с южнее и восточнее о-ва Фуругельма по направлению к п-ову Гамова [4] и далее восточнее о-ва Большой Пелис, доходя иногда почти до о-ва Аскольд (28 августа 2007 г., рис. 1). Наблюдаемая вихревая картина не стационарна. Весь период от момента зарождения первого вихря до диссипации последнего составляет 3–5 сут.

#### *Особенности поверхностной циркуляции по спутниковым изображениям, полученным в ИК-диапазоне спектра*

Описанные выше особенности распространения стока р. Туманная могут быть объяснены только влиянием поверхностных течений. Благодаря относительно высоким градиентам температуры поверхности воды динамику вод в исследуемом районе можно проследить на спутниковых изображениях, полученных в тепловом ИК-диапазоне. Цветовые контрасты на видимых изображениях спектрорадиометров MODIS (рис. 1) хорошо коррелировали с температурными неоднородностями на ИК-снимках, полученных на 31-м канале (10,78–11,28 мкм). Из-за низкого пространственного разрешения (1 км) и небольших масштабов района эти изображения не очень информативны. Гораздо нагляднее тепловые ИК-изображения, полученные со спутников серии Landsat (разрешение 60, 10 и 120 м в зависимости от сенсора).

Примеры трансграничного переноса поверхностных вод в ЗПВ представлены на ИК-изображениях со спутников Landsat (рис. 2). Стрелками показаны направления течений. Более теплая вода на снимках выглядит более светлой. На рис. 2а, б приведены изображения, на которых зарегистрирован перенос вод под влиянием Приморского течения – вдоль кромки шельфа на юго-запад. Трансграничный заток вод с запада-юго-запада и с юго-запада может осуществляться как по периферии теплого антициклона синоптического масштаба (рис. 2в), так и отделяющимся от него течением, которое может быть ламинарной струей или вихревым потоком (рис. 2г, е). На рис. 2в, г видно, как упомянутые течения вовлекают за собой сток р. Туманная (в ноябре речные воды холоднее морских, а в апреле наоборот). Чаще всего трансграничный поток в ЗПВ сопровождается формированием в юго-западной части его акватории целой системы разномасштабных спиральных циклонических вихрей (рис. 2д, е).

Качественные оценки поверхностных течений (направления потоков) могут быть получены при экспертном анализе положения вихрей, фронтов и стримеров, выявленных на спутниковых изображениях. На рис. 3 приведен результат такого анализа, выполненный на основе ИК-изображения, полученного со спутника Landsat-7 25 сентября 2001 г. Из приведенной схемы видно, что в северо-западной части Японского моря в российский сектор с юго-запада проникает прибрежное течение шириной примерно 50 км. Течение достигает границ Уссурийского залива, при этом с северной его стороны образуются разномасштабные спиральные циклонические вихри с холодными ядрами (вероятно, из-за подъема более глубоких вод). Диаметры вихрей в пределах 3–30 км.

При рассмотрении масштабов и угроз трансграничного переноса загрязняющих веществ в данном районе в качестве потенциального и актуального источника загрязнения

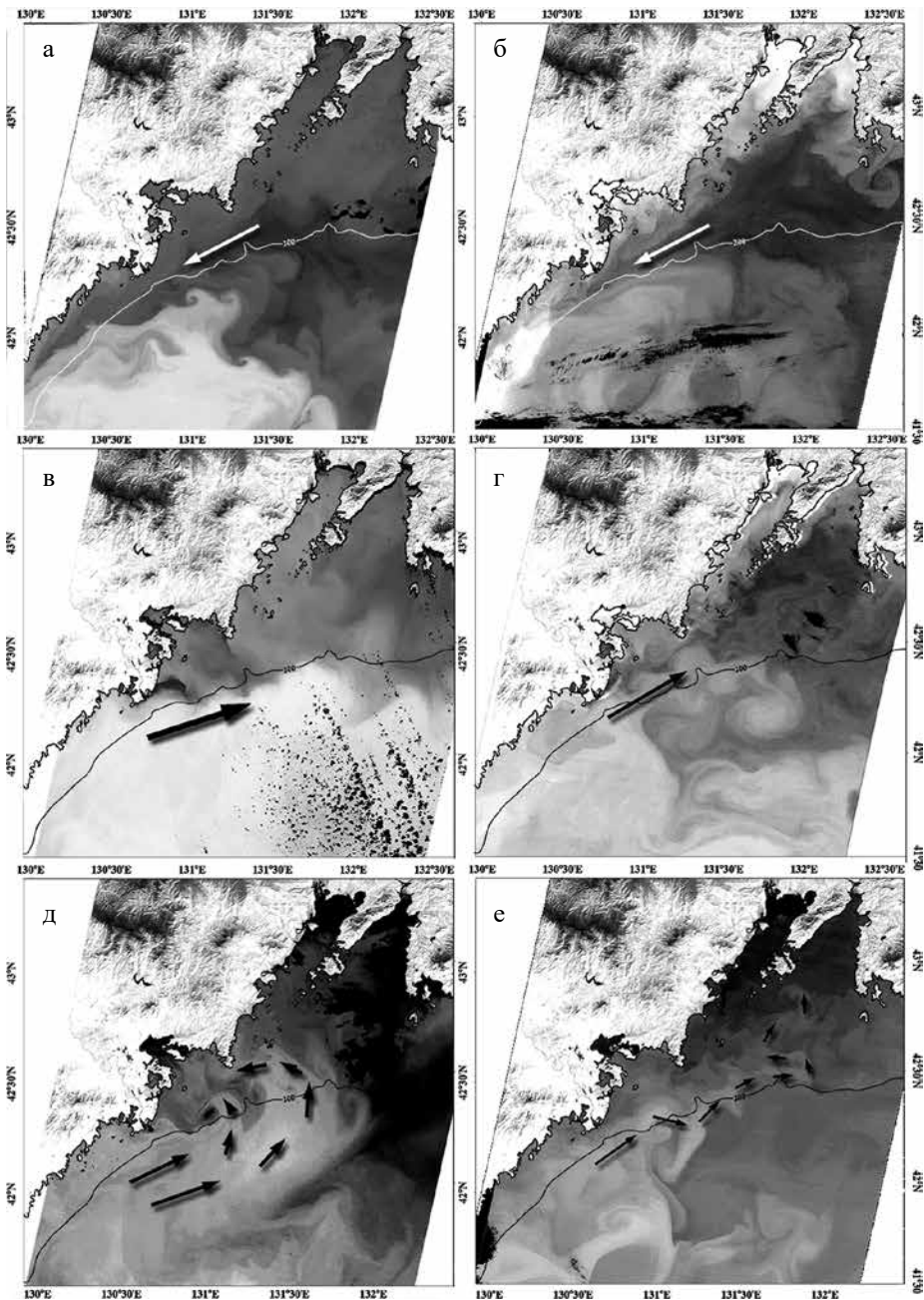


Рис. 2. Особенности трансграничного переноса в зал. Петра Великого на изображениях в ИК-диапазоне со спутников Landsat: *а* – 19.10.1995 г., *б* – 5.06.1998 г., *в* – 6.11.1996 г., *г* – 21.04.1999 г., *д* – 8.10.1997 г., *е* – 25.02.1998 г. Стрелками показаны направления течений

акватории зал. Петра Великого, кроме стока р. Туманная, следует рассматривать последствия рыболовства в территориальных водах КНДР, прилегающих к морской границе РФ. В Северной Корее широко развита рыбодобывающая отрасль. В стране производятся промысловые суда разного класса от небольших траулеров до плавбаз водоизмещением 10 тыс. т. По некоторым данным, годовая добыча рыбной отрасли КНДР достигает 1–3,5 млн т. В территориальных и экономических водах Северной Кореи в северо-западной части Японского моря на изображениях, полученных со спутников Landsat и Sentinel,

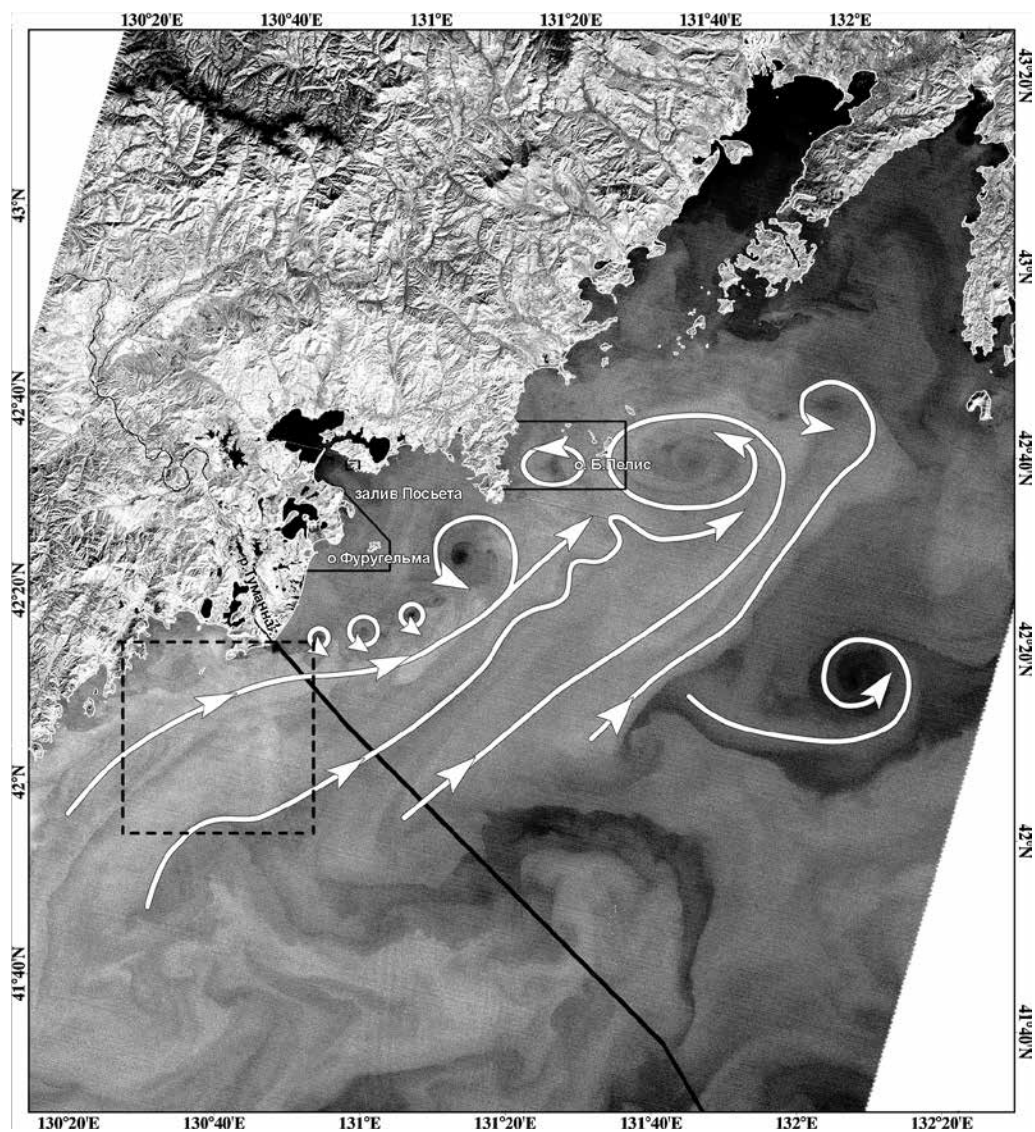


Рис. 3. Схема течений в зал. Петра Великого, построенная на основе ИК-изображения, полученного со спутника Landsat-7 25 сентября 2001 г. Черными линиями показаны границы ДВГМЗ и морская граница РФ

регистрируется огромное количество судов [5, 6]. Максимальное зарегистрированное их количество превышает 1000 единиц, а плотность – до одного судна на квадратную милю [5]. В сентябре 2012 г. во время ловли кальмара, который в это время перемещается из российских вод на юг, вдоль морской границы РФ в полосе шириной примерно 20 миль и длиной более 100 миль на радиолокационном изображении, полученном со спутника Radarsat-2, было зарегистрировано более 600 судов с максимальной концентрацией 6 единиц на квадратную милю [6]. В прибрежном районе, границы которого показаны пунктиром на рис. 3, на радиолокационном изображении с размером пикселя 25 x 25 м были уверенно идентифицированы 174 судна [6].

В процессе эксплуатации судов образуются твердые, жидкие и газообразные отходы, которые наносят вред окружающей среде. Вопросы, связанные с загрязнением с судов, регламентируются международной конвенцией МАРПОЛ 73/78, правила которой не всегда и не везде соблюдаются. Рыболовные суда являются источниками как «универсальных»

загрязнителей (ляляльные воды, шлам, бытовые отходы и пр.), так и специфических – твердого мусора, возникающего при повреждении, разрушении или утрате орудий рыболовства. В последние десятилетия настоящим бедствием для зал. Петра Великого стали обрывки и пенопластовые поплавки сетей северо-корейских рыбаков. Этими фрагментами рыболовных снастей буквально усыпаны берега островов и материковое побережье юго-западной части ЗПВ. Помимо захламления самой богатой по таксономическому разнообразию морской акватории России, эти сети представляют собой прямую угрозу обитателям морского заповедника. Время и места появления этого мусора часто никак не связаны с ветровым режимом, что прямо подтверждает результаты спутникового исследования особенностей трансграничного переноса и позволяет сделать следующие выводы:

1. Согласно анализу многолетних спутниковых наблюдений трансграничный перенос в северо-западной части Японского моря почти с равной повторяемостью направлен в юго-западных и противоположных направлениях и наблюдается как вдоль устья р. Туманная, так и мористее.

2. Заток поверхностных вод в российский сектор Японского моря из экономической зоны КНДР происходит во все сезоны, напрямую не зависит от направления ветра и отражает, вероятно, межгодовую, сезонную и синоптическую изменчивость поверхностной циркуляции Японского моря.

3. Северо-восточный трансграничный поток сопровождается образованием системы мезомасштабных циклонических вихрей, которые обуславливают интенсивное вертикальное и горизонтальное перемешивание в юго-западной части зал. Петра Великого.

Авторы благодарят К.Г. Куликову за помощь в подготовке спутниковых изображений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вышкварцев Д.И., Лебедев Е.Б. Проект экономического развития реки Туманган (TREDA) – угроза экосистеме мелководных бухт залива Посьета Японского моря // Биология моря. 1997. Т. 23, № 1. С. 51–55.
2. Григорьева Н.И., Мощенко А.В. Водный перенос и гидрологические условия акватории к северу от устья реки Туманная // Вестн. ДВО РАН. 1998. № 1. С. 7–11.
3. Григорьева Н.И., Кучерявенко А.В. Гидрологические условия юго-западной части зал. Петра Великого // Изв. ТИНРО. 2002. Т. 131. С. 78–95.
4. Дубина В.А., Файман П.А., Пономарев В.И. Вихревая структура течений в заливе Петра Великого // Изв. ТИНРО. 2013. Т. 173. С. 247–258.
5. Дубина В.А., Плотников В.В., Круглик И.А. Оценка рыболовного трафика вблизи морской границы РФ и КНДР // Новации в рыбной отрасли – импульс эффективного использования и сохранения биоресурсов Мирового океана: материалы Нац. очно-заоч. науч.-практ. конф. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2018. С. 15–18.
6. Дубина В.А., Плотников В.В. Спутниковый радиолокационный мониторинг положения судов // Научно-практические вопросы регулирования рыболовства: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2013. С. 68–72.
7. Лоция северо-западного берега Японского моря от реки Туманная до мыса Белкина. Л.: ГУНиО МО СССР, 1984. 319 с.
8. Мощенко А.В., Ванин Н.С., Ламыкина А.Е. Рельеф дна, донные отложения и гидрологические условия российской части приустьевой зоны реки Туманной // Экологическое состояние и биота юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. Владивосток: Дальнаука, 2000. Т. 1. С. 42–75.
9. Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А. Возможные пути переноса теплых субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // Изв. ТИНРО. 2002. Т. 131. С. 41–53.
10. Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. 174 с.
11. Vanin N.S., Moshchenko A.V., Feldman K.L., Yurasov G.I. Simplified numerical model of the wind-driven circulation with emphasis on distribution of the Tuman River solid run-off // Ocean Research. 2000. Vol. 22 (2). P. 81–90.