

УДК 551.465

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛЮМА РЕКИ АМУР В АМУРСКОМ ЛИМАНЕ, САХАЛИНСКОМ ЗАЛИВЕ И ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ

© 2017 г. А. А. Осадчиев

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия**e-mail: osadchiev@ocean.ru*

Поступила в редакцию 10.08.2016 г.

После доработки 17.11.2016 г.

Данная работа посвящена исследованию распространения плюма реки Амур в течение периодов открытой воды в Амурском лимане и прилегающих акваториях Сахалинского залива и Татарского пролива. На основе спутниковых снимков MERIS/EnviSat, реанализа ветра MERRA и данных о расходе реки Амур за 2002–2011 годы было установлено, что в июне–октябре происходит регулярный вынос вод амурского плюма из Амурского лимана в Сахалинский залив. Этот процесс вызывается паводковым стоком реки Амур в отсутствие сильных северных ветров или сильными южными ветрами в периоды умеренного стока. Оценка частоты и продолжительности данного процесса показала, что он происходит в среднем в течение половины дней в июне–октябре и может иметь непрерывную продолжительность до 2.5 месяцев. Распространение амурского плюма в Татарский пролив является существенно более редким событием. Этот процесс происходит только во время паводка на Амуре и под воздействием сильных западных ветров, которые вызывают экмановский транспорт в южном направлении. Средняя продолжительность данного процесса в течение периода открытой воды оценивается в 15 дней, однако в отдельные годы она может составлять всего несколько дней.

DOI: 10.7868/S0030157417020150

### 1. ВВЕДЕНИЕ

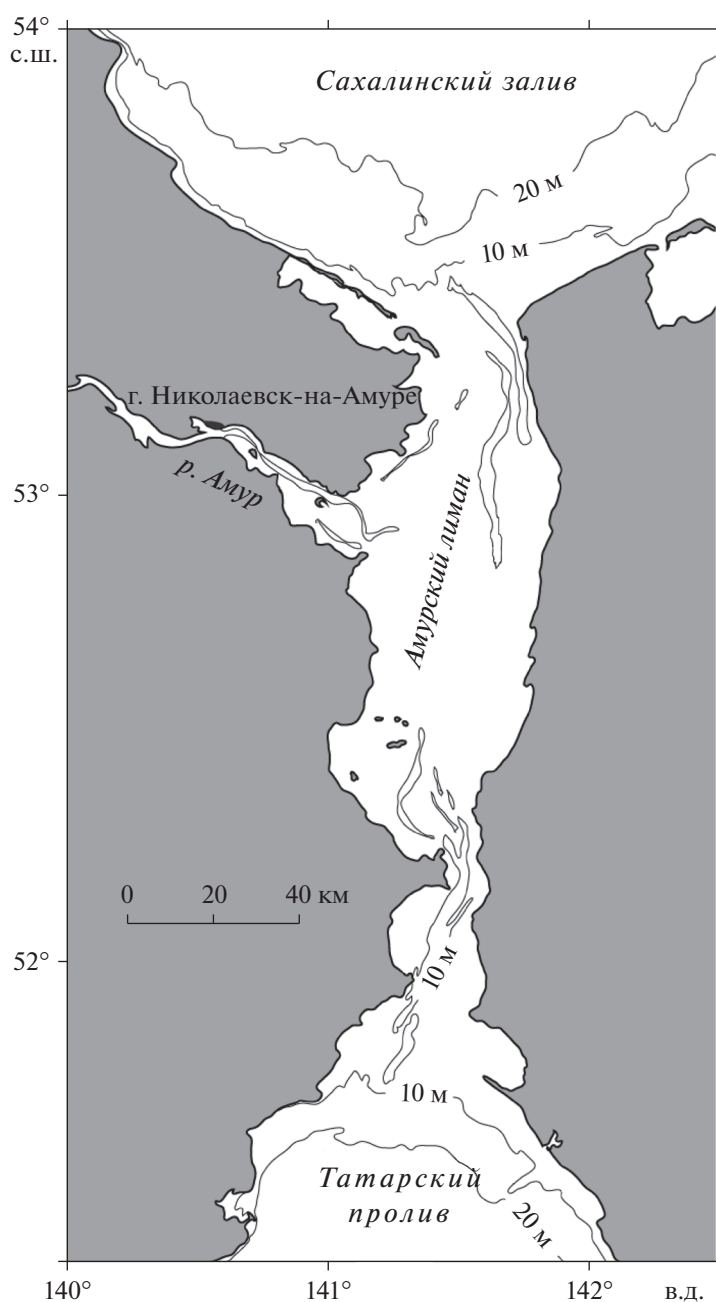
Амур, крупнейшая река российского Дальнего Востока, занимает 9 место в мире по площади водосборного бассейна (2129700 км<sup>2</sup>) и 15 место по объему стока (360 км<sup>3</sup>/год). Подавляющая часть стока Амура формируется за счет летне-осенних муссонных дождей, в результате чего на время паводка с мая по октябрь приходится 85–90% годового стока. Амур впадает в мелководный Амурский лиман (средняя глубина — 4 м), протянувшийся с севера на юг и имеющий сравнительно небольшие размеры (4200 км<sup>2</sup>). Амурский лиман связан с Сахалинским заливом Охотского моря с севера и Татарским проливом Японского моря с юга двумя узкими проливами шириной 24 км и 7 км соответственно (рис. 1). Таким образом, в силу своей формы, Амурский лиман не является классическим речным лиманом, вытянутым вдоль направления течения реки. Этот факт существенным образом влияет на динамику амурского плюма, формирующегося в Амурском лимане, в частности, на его распространение в Сахалинском заливе и Татарском проливе [1, 2, 6].

Вместе с речной водой в Амурский лиман выносятся большое количество терригенной взвеси, биогенных элементов и антропогенных загрязне-

ний [2, 3, 5, 7]. Таким образом, значительный сток реки Амур в летне-осенний период оказывает существенное воздействие на физические, химические и биологические процессы как непосредственно в Амурском лимане и прилегающих акваториях Сахалинского залива и Татарского пролива [2–6], так и в масштабах всего Охотского моря [7, 8, 10], чему были посвящены многочисленные исследования. Тем не менее, многие важные аспекты динамики самого амурского плюма остаются недостаточно изученными. Данная работа посвящена исследованию распространения амурского плюма в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе в период открытой воды (июнь–октябрь), и оценке степени влияния на этот процесс внешних факторов, а именно, объема речного расхода и ветрового воздействия.

### 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

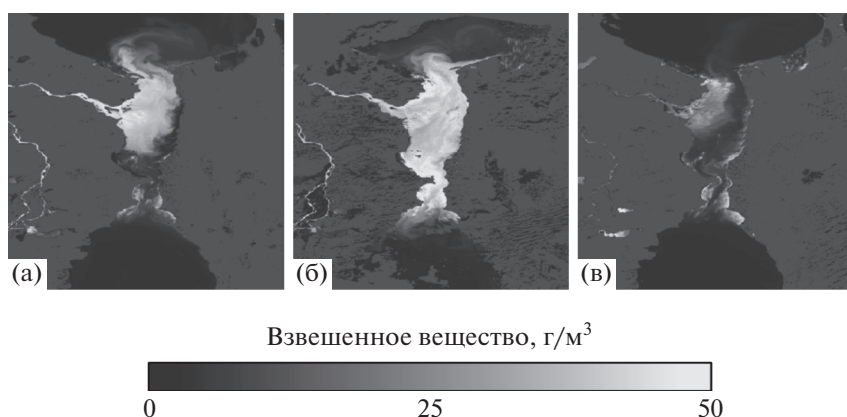
Для исследования пространственного распространения амурского плюма использовались данные спутникового сканера цвета MERIS/EnviSat с 300-метровым пространственным разрешением. Исходные спутниковые данные обрабатывались с помощью модуля Case-2 Regional про-



**Рис. 1.** Батиметрическая карта района исследований: Амурский лиман и прилегающие акватории Сахалинского залива и Татарского пролива.

граммного пакета BEAM VISAT, в результате чего рассчитывались поверхностные распределения концентраций взвешенного вещества и хлорофилла “а” в исследуемом регионе. В силу того, что воды Амура содержат большое количество взвешенных и биогенных веществ по сравнению с фоновыми морскими водами, повышенные концентрации взвеси и хлорофилла “а” в прибрежных зонах, видимые на спутниковых снимках, являются хорошими маркерами речного плюма.

В рамках данной работы были проанализированы спутниковые снимки MERIS/EnviSat, сделанные в 2004–2011 годах в июне–октябре. Из-за частой облачной погоды в данном регионе, препятствующей расчету концентраций взвеси и хлорофилла “а” на оптических снимках, были отобраны лишь 34 спутниковых снимка, условия облачности на которых позволяли определить область распространения амурского плюма в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе. Качественная валидация использова-



**Рис. 2.** Примеры выноса/отсутствия выноса вод амурского плюма на спутниковых картах MERIS/EnviSat поверхностного распределения концентраций взвеси в исследуемом районе: (а) вынос в Сахалинский залив (27 августа 2010 г.), (б) вынос в Татарский пролив (7 октября 2009 г.), (в) отсутствие выноса (4 сентября 2008 г.).

ния спутниковых снимков для оценки пространственного распространения амурского плюма основывалась на натурных данных о солёности, собранных во время экспедиций в данный район и опубликованных в работах [4, 6] (гидрографическое судно “БГК-795”, 5–20 июня 2006) и [3, 6] (НИС “Профессор Гагаринский”, 6–17 июня 2007).

На 17-ти рассмотренных снимках присутствовал активный вынос вод амурского плюма в Сахалинский залив, а на 6-ти – вынос в Татарский пролив, причем в 3-х случаях имели место оба процесса, а в 14-ти активный вынос вод плюма из Амурского лимана отсутствовал. Характерные примеры выноса вод амурского плюма в Сахалинский залив, Татарский пролив, а также пример отсутствия выноса представлены на рис. 2.

Оценка влияния внешних факторов на динамику распространения амурского плюма производилась на основе следующих данных о речном расходе и ветровом воздействии. Среднесуточные значения расхода Амура рассчитывались на основе измерений уровня реки, которые производились на гидрологическом посту, расположенном в городе Николаевск-на-Амуре в 40 км от створа речного устья (рис. 1). Атмосферное воздействие на амурский плюм исследовалось на основе данных 6-часового реанализа ветра MERRA с пространственным разрешением в 1/2 градуса по широте и 2/3 градуса по долготе. Для получения среднесуточных значений напряжения трения ветра в исследуемом регионе вначале рассчитывались векторные поля напряжения трения ветра  $\tau = \rho_a C_D |\mathbf{v}|$ , где  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $C_D$  – коэффициент шероховатости, заданный равным 0.0013 [12],  $\mathbf{v}$  – скорость ветра на высоте 10 м, рассчитанная реанализом MERRA. Затем полученные значения компонент напряжения трения ветра осреднялись по периоду в 72 часа, предшествующих рассматриваемому дню. Далее полу-

ченные значения осреднялись по отдельности по исследуемым регионам: для северной части Амурского лимана и прилегающей части Сахалинского залива (52.5°–53.5° с.ш., 140°40′–142° в.д.) и для южной части Амурского лимана и прилегающей части Татарского пролива (51.5°–52.5° с.ш., 140°40′–142° в.д.).

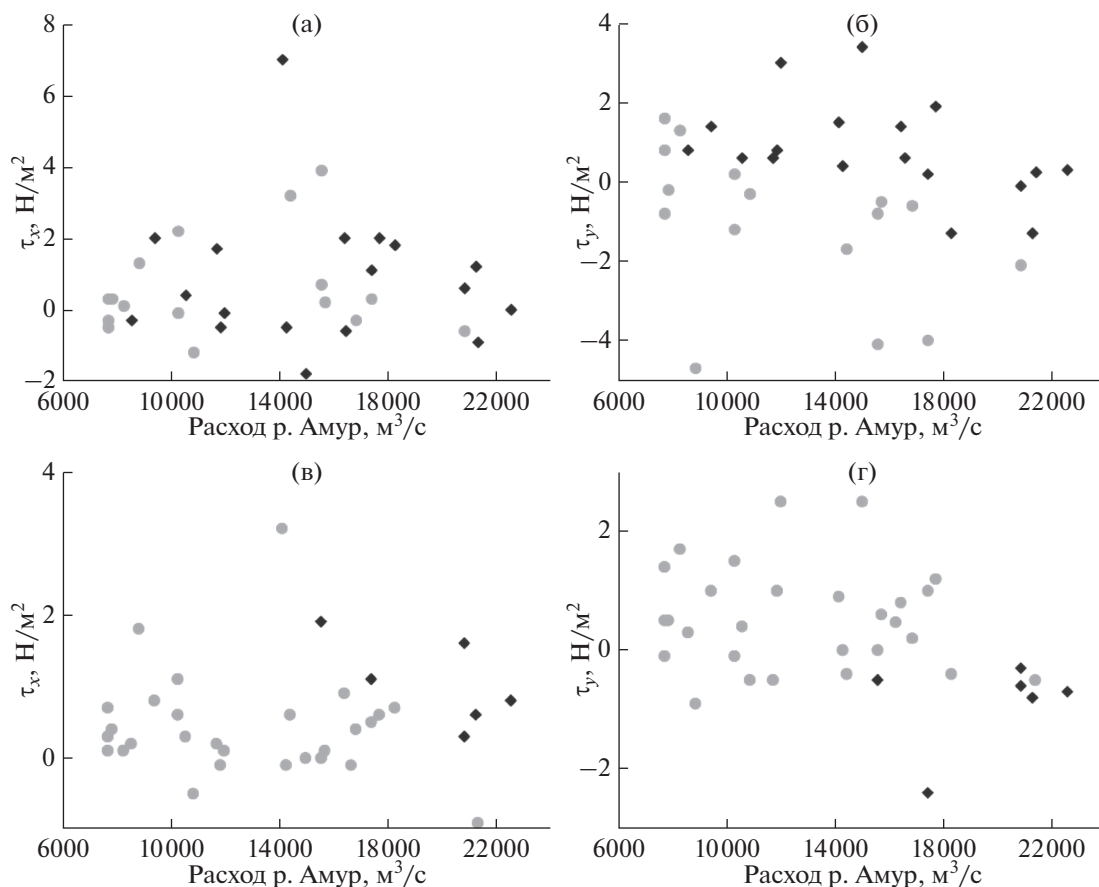
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**3.1. Динамика амурского плюма.** Согласно работе [13], зная физические параметры речного потока, можно рассчитать горизонтальный масштаб поверхностного растекания приустьевой части плюма в отсутствие внешнего воздействия с

помощью формулы 
$$L = \frac{2(3g'h + w^2)}{f\sqrt{2g'h + w^2}},$$
 где

$g' = g \frac{\rho_s - \rho_p}{\rho_s}$  – редуцированное ускорение свободного падения,  $\rho_p$  – плотность воды в плюме,  $\rho_s$  – плотность воды в окружающем море,  $f$  – параметр Кориолиса,  $w$  – скорость стока реки,  $h$  – глубина реки в устье. В случае амурского плюма, задавая исходные параметры равными следующим значениям:  $\rho_p = 1008 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_s = 1032 \text{ кг/м}^3$ ,  $f = 1.16 \times 10^{-4}$ ,  $w = 0.5 \text{ м/с}$ ,  $h = 3 \text{ м}$ , получаем 
$$L = \frac{2(3 \times 0.23 \times 3 + 0.25)}{1.16 \times 10^{-4} \sqrt{2 \times 0.23 \times 3 + 0.25}} \sim 30 \text{ км},$$
 что сравнимо с горизонтальными масштабами Амурского лимана (80 км в длину и 25–40 км в ширину).

Другая важная характеристика динамики плюма, стоковое число Кельвина  $K = \frac{fL}{\sqrt{g'h}}$ , в случае амурского плюма принимает значение, равное 
$$K = \frac{1.16 \times 10^{-4} \times 3 \times 10^4}{\sqrt{0.23 \times 3}} \sim 4,$$
 что свидетельствует о



**Рис. 3.** Значения расхода реки Амур и зональной (а, в) и меридиональной (б, г) компонент напряжения трения ветра для рассматриваемых дней. Черные ромбы обозначают вынос вод амурского плюма в (а, б) Сахалинский залив и (в, г) Татарский пролив, а серые круги — отсутствие выноса.

значимом воздействии силы Кориолиса на распространение амурского плюма [9]. Таким образом, в отсутствии внешнего воздействия и при идеализированной донной топографии и линии берега амурский плюм должен занимать большую часть площади Амурского лимана и формировать стационарное вдольбереговое течение в южном направлении. Тем не менее, в силу малых размеров, мелководности и замкнутости Амурского лимана, а также из-за активного ветрового воздействия подобного течения не наблюдается. Напротив, амурский плюм значительно интенсивнее выносится в северном направлении в Сахалинский залив [1, 2].

**3.2. Синоптическая изменчивость амурского плюма.** Объем речного расхода и ветровое воздействие — основные внешние факторы, влияющие на структуру и динамику речного плюма [11]. Полученные значения расхода реки Амур ( $Q$ ), а также зональной ( $\tau_x$ ) и меридиональной ( $\tau_y$ ) компонент напряжения трения ветра для 34-х рассматриваемых дней отдельно для Сахалинского залива и Татарского пролива с индикацией ак-

тивного выноса вод плюма в Сахалинский залив и Татарский пролив представлены в таблице и на рис. 3.

Полученные данные показывают, что формирование выноса вод амурского плюма в Сахалинский залив не обнаруживает связи с  $\tau_x$  (рис. 3а), но при этом имеет существенную зависимость от  $\tau_y$  (рис. 3б). Вынос вод плюма в Татарский пролив, напротив, характеризуется значительной корреляцией с  $\tau_x$  (рис. 3в), но не зависит от  $\tau_y$  (рис. 3г). Таким образом, при относительно симметричной геометрии района исследования распространение плюма на север определяется меридиональной компонентой напряжения трения ветра, а на юг — зональной. Подобная асимметрия, по-видимому, вызвана влиянием силы Кориолиса на распространение вод плюма и объясняется следующим образом.

Численные эксперименты, описанные в работе [11], показали, что вдольбереговой перенос плюма в направлении, совпадающем с направлением силы Кориолиса, действующей на речные воды, впадающие в море, существенно эффек-

Значения расхода реки Амур, компонент напряжения трения ветра, а также индикация выноса вод амурского плюма в Сахалинский залив и Татарский пролив для рассматриваемых дней

Дата	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	Сахалинский залив			Татарский пролив		
		вынос	$\tau_x$ , Н/м <sup>2</sup>	$\tau_y$ , Н/м <sup>2</sup>	вынос	$\tau_x$ , Н/м <sup>2</sup>	$\tau_y$ , Н/м <sup>2</sup>
22.08.2004	14250	+	$-0.5 \times 10^{-2}$	$0.4 \times 10^{-2}$	+	$-0.1 \times 10^{-2}$	$0.0 \times 10^{-2}$
25.08.2004	17385		$0.3 \times 10^{-2}$	$-4.0 \times 10^{-2}$		$1.1 \times 10^{-2}$	$-2.4 \times 10^{-2}$
05.09.2004	15533		$3.9 \times 10^{-2}$	$-4.1 \times 10^{-2}$		$1.9 \times 10^{-2}$	$-0.5 \times 10^{-2}$
25.06.2005	20805		$-0.6 \times 10^{-2}$	$-2.1 \times 10^{-2}$	+	$0.3 \times 10^{-2}$	$-0.6 \times 10^{-2}$
08.08.2005	10260		$2.2 \times 10^{-2}$	$-1.2 \times 10^{-2}$		$1.1 \times 10^{-2}$	$-0.1 \times 10^{-2}$
05.09.2005	8835		$1.3 \times 10^{-2}$	$-4.7 \times 10^{-2}$		$1.8 \times 10^{-2}$	$-0.9 \times 10^{-2}$
28.09.2005	10545	+	$0.4 \times 10^{-2}$	$0.6 \times 10^{-2}$		$0.3 \times 10^{-2}$	$0.4 \times 10^{-2}$
01.10.2005	9405	+	$2.0 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$		$0.8 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2}$
25.06.2006	10260		$-0.1 \times 10^{-2}$	$0.2 \times 10^{-2}$		$0.6 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$
05.07.2006	15675		$0.2 \times 10^{-2}$	$-0.5 \times 10^{-2}$	+	$0.1 \times 10^{-2}$	$0.6 \times 10^{-2}$
22.08.2006	17670		$2.0 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-2}$		$0.6 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$
03.06.2007	11970	+	$-0.1 \times 10^{-2}$	$3.0 \times 10^{-2}$	+	$0.1 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-2}$
07.06.2007	11828	+	$-0.5 \times 10^{-2}$	$0.8 \times 10^{-2}$		$-0.1 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2}$
19.06.2007	10830		$-1.2 \times 10^{-2}$	$-0.3 \times 10^{-2}$		$-0.5 \times 10^{-2}$	$-0.5 \times 10^{-2}$
02.07.2007	8550		$-0.3 \times 10^{-2}$	$0.8 \times 10^{-2}$	+	$0.2 \times 10^{-2}$	$0.3 \times 10^{-2}$
16.09.2007	14393		$3.2 \times 10^{-2}$	$-1.7 \times 10^{-2}$		$0.6 \times 10^{-2}$	$-0.4 \times 10^{-2}$
20.09.2007	16388	+	$2.0 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$		$0.9 \times 10^{-2}$	$0.8 \times 10^{-2}$
04.06.2008	7838		$0.3 \times 10^{-2}$	$-0.2 \times 10^{-2}$		$0.4 \times 10^{-2}$	$0.5 \times 10^{-2}$
22.08.2008	8265		$0.1 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$		$0.1 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-2}$
04.09.2008	7695		$-0.5 \times 10^{-2}$	$0.8 \times 10^{-2}$		$0.7 \times 10^{-2}$	$0.5 \times 10^{-2}$
14.09.2008	7695		$0.3 \times 10^{-2}$	$-0.8 \times 10^{-2}$		$0.3 \times 10^{-2}$	$-0.1 \times 10^{-2}$
17.06.2009	7695		$-0.3 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-2}$	+	$0.1 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$
20.09.2009	21233	+	$1.2 \times 10^{-2}$	$-1.3 \times 10^{-2}$		$0.6 \times 10^{-2}$	$-0.8 \times 10^{-2}$
07.10.2009	22515	+	$0.0 \times 10^{-2}$	$0.3 \times 10^{-2}$		$0.8 \times 10^{-2}$	$-0.7 \times 10^{-2}$
27.05.2010	21233	+	$-0.4 \times 10^{-2}$	$0.2 \times 10^{-2}$	+	$-1.1 \times 10^{-2}$	$-0.6 \times 10^{-2}$
28.06.2010	15533		$0.7 \times 10^{-2}$	$-0.8 \times 10^{-2}$		$0.0 \times 10^{-2}$	$0.0 \times 10^{-2}$
27.08.2010	18240		$1.8 \times 10^{-2}$	$-1.3 \times 10^{-2}$		$0.7 \times 10^{-2}$	$-0.4 \times 10^{-2}$
02.09.2010	20805	+	$0.6 \times 10^{-2}$	$-0.1 \times 10^{-2}$		$1.6 \times 10^{-2}$	$-0.3 \times 10^{-2}$
30.05.2011	16530	+	$-0.5 \times 10^{-2}$	$0.6 \times 10^{-2}$		$-0.1 \times 10^{-2}$	$0.2 \times 10^{-2}$
01.06.2011	14963	+	$-1.8 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-2}$		$0.0 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-2}$
02.09.2011	17385	+	$1.1 \times 10^{-2}$	$0.2 \times 10^{-2}$		$0.5 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2}$
11.09.2011	14108	+	$7.0 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$		$3.2 \times 10^{-2}$	$0.9 \times 10^{-2}$
24.09.2011	16815		$-0.3 \times 10^{-2}$	$-0.6 \times 10^{-2}$		$0.4 \times 10^{-2}$	$0.2 \times 10^{-2}$
08.10.2011	11685		$1.7 \times 10^{-2}$	$0.6 \times 10^{-2}$		$0.2 \times 10^{-2}$	$-0.5 \times 10^{-2}$

тивнее осуществляется “сгонным” (направленным от берега) ветром, по сравнению с “даунвеллинговым” (направленным по силе Кориолиса) ветром. С другой стороны, интенсивный вдольбереговой перенос плюма в противоположном направлении происходит под влиянием “апвеллингового” (направленного против силы Кориолиса), а не “нагонного” (направленного на берег) ветра. В рассматриваемом регионе сила Кориоли-

са, действующая на воды Амура, впадающие в Амурский лиман, направлена на юг. Таким образом, вынос вод плюма в Сахалинский залив происходит под воздействием южного ветра, т.е. зависит от  $\tau_y$ , а вынос в Амурский залив определяется западным ветром и зависит от  $\tau_x$ .

Полученные данные показывают, что активный вынос вод амурского плюма в Татарский пролив происходил только во время паводков на

Амуре, когда его расход превышал 15000 м<sup>3</sup>/с. При этом данному процессу обязательно предшествовал западный ветер, вызывавший экмановский перенос в южном направлении. В частности, при уровне расхода воды от 15000 до 20000 м<sup>3</sup>/с вынос происходил только при сильном ветре ( $\tau_x > 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>) (например, 25 августа 2004 г.:  $Q = 17385$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_x = 1.1 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>) и не происходил при умеренном ветре (например, 22 августа 2006 г.:  $Q = 17670$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_x = 0.6 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>). Если расход Амура был больше 20000 м<sup>3</sup>/с, то вынос происходил при любом, даже очень слабом, западном ветре (например, 25 июля 2005 г.:  $Q = 20805$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_x = 0.3 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>), но не происходил при восточном ветре (например, 27 мая 2010 г.:  $Q = 21233$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_x = -1.1 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>). При расходе менее 15000 м<sup>3</sup>/с вынос вод амурского плюма в Татарский пролив отсутствовал даже при очень сильном западном ветре (например, 11 сентября 2011 г.:  $Q = 14108$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_x = 3.2 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>).

В силу того, что место впадения Амура в Амурский лиман находится почти в два раза ближе к Сахалинскому заливу (40–50 км), чем к Татарскому проливу (90–100 км), а ширина створа Сахалинского залива (24 км) значительно больше ширины створа пролива Невельского (7 км), активный вынос вод амурского плюма в Сахалинский залив требует значительно менее интенсивного внешнего воздействия. В частности, вынос возможен даже при относительно низких значениях расхода Амура (8500–15000 м<sup>3</sup>/с) при умеренном северном ветре ( $\tau_y > 0.5 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>) (например, 07 июня 2007 г.:  $Q = 11828$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y = 0.8 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>), но при слабом ветре вынос не происходит (например, 25 июня 2006 г.:  $Q = 10260$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y = 0.2 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>). При совсем низком расходе (менее 8500 м<sup>3</sup>/с) даже сильного ветра уже недостаточно для выноса (например, 22 августа 2008 г.:  $Q = 8265$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y = 1.3 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>). При высоком уровне расхода активный вынос амурского плюма в Сахалинский залив не требует ветрового воздействия, и роль ветра с усиливающей меняется на сдерживающую. Так, уже при уровне расхода от 15000 до 18000 м<sup>3</sup>/с вынос происходил даже при практически полном отсутствии ветра (например, 2 сентября 2011 г.:  $Q = 17385$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y = 0.2 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>), но не происходил при умеренном северном ветре (например, 5 июля 2006 г.:  $Q = 15675$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y = -0.5 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>). При расходе более 18000 м<sup>3</sup>/с только воздействие очень сильного северного ветра ( $\tau_y < -2.0 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>) препятствует формированию выноса (например, 25 июня 2005 г.:  $Q = 20805$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y = -2.1 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>), а при сильном или умеренном северном ветре вы-

нос происходит (например, 20 сентября 2009 г.:  $Q = 21233$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y = -1.3 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>).

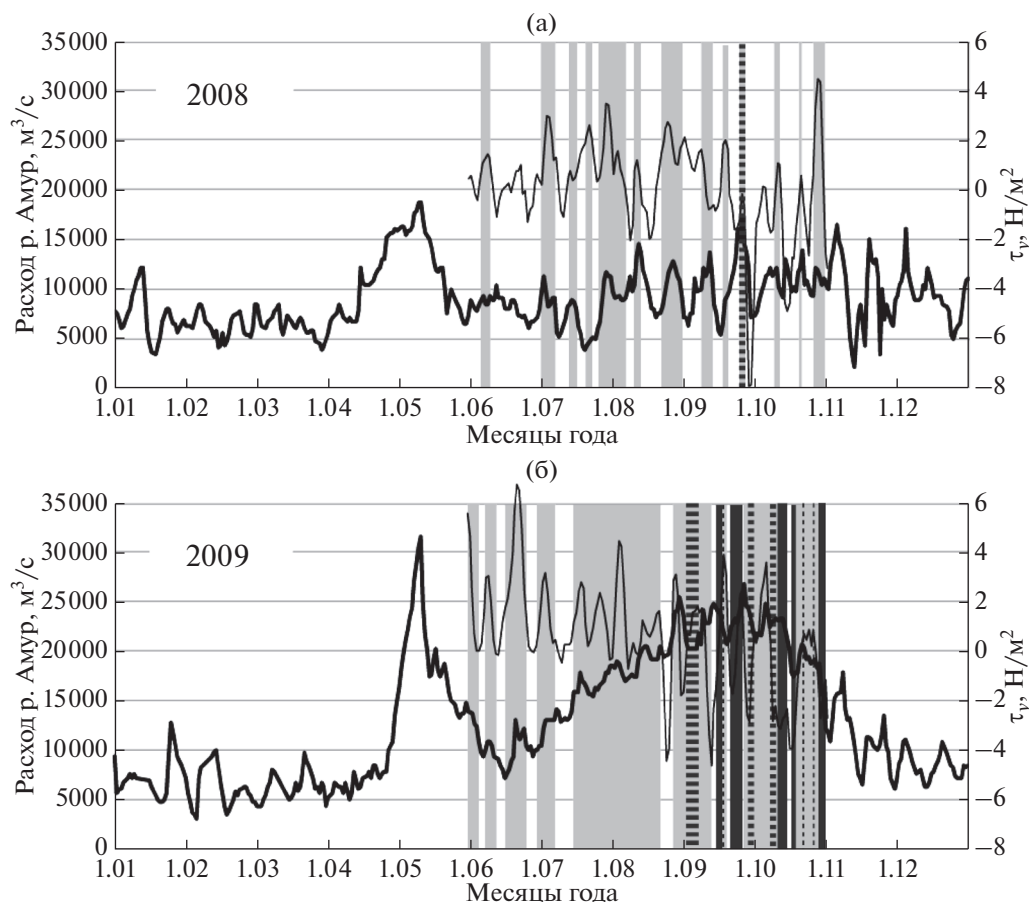
**3.3. Сезонная и межгодовая изменчивость амурского плюма.** Для того чтобы оценить частоту и продолжительность активного выноса вод амурского плюма в Сахалинский залив и Татарский пролив в период открытой воды, были выработаны следующие критерии формирования выноса в Сахалинский залив:  $Q > 18000$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y > -2.0 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup> или  $18000 > Q > 15000$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y > -0.5 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup> или  $15000 > Q > 8500$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y > 0.5 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup> или  $Q < 8500$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_y > 2.0 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>; и в Татарский пролив:  $Q > 20000$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_x > 0$  Н/м<sup>2</sup> или  $20000 > Q > 15000$  м<sup>3</sup>/с,  $\tau_x > 1.0 \times 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup>. Применив эти условия к данным реанализа ветра MERRA и данным расхода Амура за 2002–2011 гг., были рассчитаны периоды выноса вод амурского плюма в Сахалинский залив и Татарский пролив. Примеры лет, характеризующихся пониженным (2008 г.) и повышенным (2009 г.) выносом вод амурского плюма из Амурского лимана, представлены на рис. 4.

Общая продолжительность активного выноса вод амурского плюма в Сахалинский залив в 2002–2011 гг. в период открытой воды составила 742 дня, т.е. практически половину исследуемого периода. Межгодовая изменчивость времени выноса была достаточно большой и колебалась от 1.5 месяцев (50 дней в 2002 и 2008 гг., 51 день в 2007 г.) до 3.5 месяцев (102 дня в 2006 г., 108 дней в 2009 г.). Наиболее продолжительный период непрерывного активного выноса амурского плюма в Сахалинский залив происходил в течение 76 дней подряд в июле–октябре 2006 г.

Суммарная продолжительность периодов выноса вод амурского плюма в Татарский пролив была гораздо меньше: 154 дня или 10% исследуемого периода. Межгодовая изменчивость времени выноса была очень значительной и колебалась от нескольких дней (2 дня в 2008 г., 3 дня в 2002 г., 4 дня в 2007 г., 6 дней в 2006 г.) до 1.5 месяцев (39 дней в 2010 г., 44 дня в 2009 г.). Наиболее продолжительный период непрерывного активного выноса амурского плюма в Татарский пролив происходил в течение 27 дней подряд в сентябре 2010 г.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы были исследованы причины, вызывающих вынос вод амурского плюма из Амурского лимана в прилегающие акватории Сахалинского залива и Татарского пролива в июне–октябре, получены оценки частоты и продолжительности этих процессов, а также рассмотрена их сезонная и межгодовая изменчивость. Совместный анализ спутниковых снимков



**Рис. 4.** Расход Амура (толстая линия) и  $\tau_y$  для Сахалинского залива (тонкая линия) в (а) 2008 и (б) 2009 гг., а также рассчитанные периоды выноса вод амурского плюма в Сахалинский залив (серые полосы) и Татарский пролив (черные полосы). В случае одновременного выноса амурского плюма в Сахалинский залив и Татарский пролив полосы показаны пунктиром.

исследуемого региона и сопутствующих ветровых условий и расхода воды позволил определить спектр значений напряжения трения ветра и расхода Амура, при которых формируются данные процессы. В частности, было показано, что переносу вод плюма в Сахалинский залив способствовал южный ветер, в то время как распространение плюма в Татарский пролив происходило под воздействием ветров восточных румбов, вызывавших экмановский перенос в южном направлении.

На основе анализа данных о ветре и расходе Амура за 10-летний период (2002–2011 гг.) было показано, что сочетание климатических колебаний расхода Амура и ветровых условий в Амурском лимане и прилегающих акваториях в период открытой воды способствуют частому формированию интенсивного выноса опресненных вод амурского плюма и переносимых ими терригенной взвеси, биогенных элементов и антропогенных загрязнений из Амурского лимана в Сахалинский залив. Данный процесс наблюдается в среднем в течение половины дней в июне–октябре и

может иметь непрерывную продолжительность до 2.5 месяцев. Подобный вынос вод может существенно влиять на качество вод, загрязнение, первичную продукцию и биологические ресурсы в Сахалинском заливе, в первую очередь, в его южной части. Вынос вод амурского плюма в Татарский пролив происходит гораздо менее интенсивно, в среднем в 5 раз реже, чем в Сахалинский залив. Более того, в отдельные годы продолжительность выноса вод амурского плюма в Татарский пролив может составлять всего несколько дней.

Автор благодарит П.О. Завьялова за ценные комментарии, позволившие улучшить работу, а также Европейское космическое агентство за предоставленные спутниковые данные и Росгидромет за предоставленные данные о расходе реки Амур.

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



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глуховский Б.Х., Гонтарев Н.П., Терзиев Ф.С. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 342 с.
2. Жабин И.А., Абросимова А.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А. Влияние стока р. Амур на гидрологические условия Амурского лимана и Сахалинского залива Охотского моря в период весенне-летнего паводка // Метеорология и гидрология. 2010. № 6. С. 93–100.
3. Жабин И.А., Пропп Л.Н., Волкова Т.И., Тищенко П.Я. Изменчивость гидрохимических и гидрологических параметров вблизи устья реки Амур // Океанология. 2005. Т. 45. № 5. С. 703–709.
4. Каретникова Е.А., Гаретова Л.А. Бактериопланктон и бактериобентос Амурского лимана и прилегающих акваторий летом 2006 г. // Океанология. 2009. Т. 49. № 3. С. 409–417.
5. Колтунов А.М., Тищенко П.Я., Звалинский В.И. и др. Карбонатная система Амурского лимана и прилегающих морских акваторий // Океанология. 2009. Т. 49. № 5. С. 694–706.
6. Стробыкина А.А., Жабин И.А., Ким В.И. и др. Особенности гидрологических процессов в Амурском лимане // Водные ресурсы и режим водных объектов. 2016. Т. 43. № 4. С. 347–358.
7. Шулькин В.М., Жабин И.А., Абросимова А.А. Влияние стока р. Амур на биогеохимический цикл железа в Охотском море // Океанология. 2014. Т. 54. № 1. С. 44–51.
8. Fujisaki A., Mitsudera H., Wang J., Wakatsuchi M. How does the Amur River discharge flow over the northwestern continental shelf in the Sea of Okhotsk? // Prog. Oceanogr. 2014. V. 126. P. 8–20.
9. Garvine R.W. A dynamical system of classifying buoyant coastal discharges // Cont. Shelf Res. 1995. V. 15. № 13. P. 1585–1596.
10. Nishioka J., Mitsudera H., Yasuda I. et al. Biogeochemical and physical processes in the Sea of Okhotsk and the linkage to the Pacific Ocean Preface // Prog. Oceanogr. 2014. V. 126. P. 1–7.
11. Osadchiev A.A., Zavialov P.O. Lagrangian model of a surface-advected river plume // Cont. Shelf Res. 2013. V. 58. P. 96–106.
12. Smith S.D. Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds // J. Phys. Oceanogr. 1980. V. 10. № 5. P. 709–726.
13. Yankovsky A.E., Chapman D.C. A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges // J. Phys. Oceanogr. 1997. V. 27. № 7. P. 1386–1401.

## Spreading of the Amur River Plume in the Amur Liman, the Sakhalin Gulf, and the Strait of Tartary

A. A. Osadchiev

This work is focused on spreading of the Amur plume during ice-free periods in the Amur Liman and the adjacent areas of the Sakhalin Gulf and the Strait of Tartary. Basing on MERIS/EnviSat satellite imagery, MERRA wind reanalysis, and Amur discharge data for 2002–2011 it was revealed that transport of the Amur plume waters from the Amur Liman to the Sakhalin Gulf regularly occurs in June–October. This process is caused by elevated discharge of the Amur River in absence of strong southward winds during freshet periods or by strong northward winds during periods of moderate discharge. Estimation of frequency and duration of this process showed that it happens on average during half of days in June–October and can continuously last up to 2.5 months. Spreading of the Amur plume to the Strait of Tartary is a significantly rarer event. This process takes place only during Amur freshet periods and under strong eastward wind forcing which induce southward Ekman transport. Average duration of this process during an ice-free season is evaluated equal to 15 days, however, in certain years it can be as low as several days.