Физические поля корабля, океана и атмосферы

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-11>
УДК 534.231,550.34.01

Т.Р. Кильматов, А.Ю. Лазарюк

КИЛЬМАТОВ ТАЛГАТ РУСТЕМОВИЧ – д.ф.-м.н., профессор, SPIN: 5972-7911,
ORCID: 0000-0002-0574-1452, ScopusID: 6506876958, e-mail: kilmatov.tr@dvfu.ru
Дальневосточный федеральный университет (Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского)
ЛАЗАРЮК АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ – к.т.н., старший научный сотрудник, SPIN: 1930-2370,
ORCID: 0000-0003-4231-9653, ResearcherID: AAN-2203-2019, ScopusID: 6507304837,
e-mail: lazaryuk@poi.dvo.ru
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, Россия

Рециркуляция вод залива Петра Великого Японского моря вследствие осеннего муссона

Аннотация: Представлены данные натурных наблюдений (2010, 2019 гг.) вод Амурского залива с целью анализа влияния осеннего муссона на циркуляцию вод. Показано, что в осенний период происходит процесс замещения вод залива свежими морскими водами вследствие рециркуляции с Японским морем. На основе модели полных потоков приведены временные масштабы этого процесса – несколько дней. Проводятся сравнительные модельные оценки влияния ветрового, термогалинного и приливного эффектов на процесс рециркуляции. Отмечается доминирующий процесс – вынос вод из залива вследствие дрейфового течения, генерируемого ветрами северных румбов. Важность представленного эффекта – природная очистка вод прилегающих к г. Владивостоку акваторий в осенний период. Прикладной эффект – учет сезонного фактора при планировании и эксплуатации объектов, имеющих антропогенное воздействие на прилегающие к г. Владивостоку заливы и бухты.

Ключевые слова: Амурский залив, залив Петра Великого, циркуляция, осенне-зимний муссон, рециркуляция вод.

Введение

Более ста лет ведутся прикладные исследования залива Петра Великого Японского моря (г. Владивосток), связанные с навигацией, рыбным промыслом, гидрометеорологическими прогнозами, академическим интересом. В последнее время появились экологические запросы на изучение и оценку антропогенного воздействия на акваторию. Можно выделить работы по гидрологии и динамике залива, базирующиеся на натурных наблюдениях [2, 5–7, 11–13, 16, 19], а также основанные на математическом моделировании циркуляции вод залива и прилегающей части Японского моря [3, 14, 15, 17, 21–23]. В целом отметим значительные различия данных наблюдений и схем течений у разных авторов. Это объясняется сложностью модельного описания реального процесса из-за множества взаимодействующих внешних факторов: изменчивый рельеф дна, извилистая форма берегов [7], наличие островов, наложение геострофических [17, 20], ветровых [3, 23], приливных [13] динамических эффектов, си-

ноптических вихрей [8, 12] и эффекта апвеллинга [9] в прилегающих водах залива. Таким образом, в настоящее время возможность построения адекватной модели динамики залива Петра Великого и Амурского залива как его части с разумной затратой ресурсов представляется затруднительной. В данной ситуации получить реальные оценки раздельного влияния динамических эффектов на исследуемый процесс можно с помощью интегрального подхода, применив универсальные интегральные уравнения сохранения. Этот метод используется ниже.

В настоящей работе рассматривается процесс замены вод в Амурском заливе свежими водами Японского моря в осенний сезон. Демонстрируются данные наблюдений, когда в период муссонов северных направлений происходит быстрое охлаждение и осолонение вод залива. Приводятся данные наблюдений и модельные расчеты, позволяющие сделать оценку раздельных вкладов значимых внешних воздействий в исследуемый процесс.

Анализ данных наблюдений

Рассмотрим данные натурных наблюдений, которые демонстрируют быструю замену вод Амурского залива в период осеннего муссона северных румбов. На рис. 1 представлена батиметрическая карта залива со схемой расположения гидрологических разрезов, выполненных в 2010 и 2019 гг.

**Рис. 1. Рельеф дна Амурского залива (изобаты 10, 15, 20, 30 м) и схема расположения станций на гидрологических разрезах: продольном Н и поперечном Т (оба выполнены 20.10.2010 и 01.11.2010), а также поперечном В (выполнен 04.09.2019, 26.09.2019 и 10.10.2019).
Здесь и далее рисунки авторов.**

Осенью 2010 г. натурные наблюдения на акватории Амурского залива проводились на станциях разрезов (продольного Н и поперечного Т) с борта НИС «Малахит», Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН. Гидрологические измерения выполнялись STD-зондом SBE-19plusV2 (США). Поперечный разрез Т располагался вдоль широты 43,20° и имел протяжённость около 13 км от м. Красный на востоке до б. Песчаная на западе. Протяжённость продольного разрез Н – 19 км от м. Токаревского вдоль долготы 131,86° (рис. 1). В 2019 г. аналогичные работы в Амурском заливе проводились только на поперечном разрезе В (м. Красный – г. Приметная). Для профилирования водной толщи использовался STD-зонд XRX-620 (Канада), работы выполнялись с борта водолазного бота Национального научного центра морской биологии (ННЦМБ ДВО РАН). Расстояния между станциями поперечных разрезов Т и В – 1÷1,5 км, а продольного Н – 2÷3,5 км.

Из-за различных видов погрешностей в исходных данных STD-зондирований была выполнена их первичная обработка. Сформированные массивы гидрологической информации имеют оценки погрешности по глубине $\pm 0,15$ м, по температуре $\pm 0,004$ °С и по солёности $\pm 0,005$ епс (епс – единицы практической солёности). Результаты повторных измерений на разрезах представлены на рис. 2 и рис. 3.

Рис. 2. Поля температуры (а, в, д, ж) и солёности (б, г, е, з), полученные на разрезах: продольном Н (а–г) и поперечном Т (д–з) с помощью зонда SBE-19+V2 20 октября 2010 г. и 1 ноября 2010 г. (НИС «Малахит»).

Рисунок 2 показывает, что осенью 2010 г., за десять дней между повторными наблюдениями, произошло охлаждение и осолонение приповерхностного десятиметрового слоя воды.

Масштаб изменения – понижение температуры воды на 2 °С и повышение солёности на 0,5 епс. Более сильный эффект охлаждения и осолонения можно проследить по наблюдениям, выполненным осенью 2019 г. на разрезе В (рис. 3). Из представленных распределений температуры и солёности следует, что в промежутке между повторным выполнением разрезов температура поверхностного пятиметрового слоя понизилась на 5 °С, а солёность увеличилась на 5 епс. Легко оценить, что если солёность увеличивается с 20 до 25 епс в фиксированном объеме за счет испарения воды, то для этого необходимо испарить 20% ее начального объема. Для рассматриваемой ситуации это нереальная цифра: тепломассообмен на поверхности не соответствует таким значительным изменениям. Рисунки 2 и 3 также демонстрируют, что вертикальное перемешивание не является причиной изменения температуры и солёности, поскольку придонные воды меняют термогалинные показатели в сторону охлаждения и осолонения. Иначе в случае перемешивания придонная вода была бы теплее и менее соленой. Таким образом, термогалинные изменения в Амурском заливе являются следствием горизонтальных адвективных процессов, причиной которых могут быть ветер, градиентные силы и приливы.

Рис. 3. Поля температуры (а, в, д) и солёности (б, г, е), полученные зондом XRX-620 (Канада) на разрезе В 4, 26 сентября и 10 октября 2019 г. (водолазный бот ННЦМБ).

В дополнение к инструментальным наблюдениям отметим, что жители Владивостока ежегодно визуально отмечают в начале осени появление у берега холодной, чистой и прозрачной воды.

С физической точки зрения источником адвекции на первое место можно поставить северный муссонный ветер, который генерирует течения из залива в открытое море, что предполагает замещение выходящих из залива вод водами Японского моря. Поверхностная теплая вода сгоняется в открытое море, что вызывает ее компенсацию холодными солеными водами. Оценочные данные по приводному ветру над заливом в период наблюдений можно увидеть в архиве погоды [1] за периоды наблюдений между разрезами. Отметим, что эти данные по береговой станции, поэтому в приводном слое Амурского залива скорость ветра больше, но генеральное направление сохраняется. В период наблюдений 20.10.2010–01.11.2010 ветер генерального направления северных румбов фиксировался в 70% случаев, причем 24–27 октября – сильный ветер: более 10 м/с. При выполнении гидрологических разрезов во временном интервале 04.09.2019–10.10.2019 свежие и сильные ветра с порывами до 20 м/с наблюдались между 18–25 сентября и 2–5 октября 2019 г.

Инженерные оценки влияния динамических факторов на процесс рециркуляции

Проведем сравнительную оценку вклада динамических факторов, которые могут участвовать в генерации адвекции и рециркуляции вод Амурского залива. Ниже демонстрируется отдельный интегральный энергетический вклад ветрового, термогалинного, приливного процессов на исследуемый процесс.

Ветровое воздействие

Оценка времени, за которое ветровой дрейф переместит воду из залива в Японское море, проводится в рамках классической модели дрейфового течения [10, 18]. Используется оценка полного потока – произведения средней скорости на глубину, т.е. детальной структурой течений по вертикали и горизонтали пренебрегаем.

В декартовой комплексной системе координат (ось y на север) полный поток в приближении классической модели дрейфовых течений имеет вид [18]

$$S = \frac{\tau}{if\rho} * \frac{ch\beta(1+i)-1}{ch\beta(1+i)}, \quad (1)$$

где $\tau = \tau_x + i\tau_y$ – касательное напряжение трения ветра, причем оно рассчитывается по полуэмпирической формуле [10] через скорость ветра W :

$$\tau = 1,3 * 10^{-3} \rho_a * W^2. \quad (2)$$

В этих формулах ρ, ρ_a – плотность воды и воздуха; $f = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ – параметр Кориолиса и его значение для залива; β – отношение глубины места к толщине слоя трения Экмана. В классическом приближении «глубокого моря» $\beta \sim \infty$ вектор дрейфового потока направлен вправо под прямым углом от вектора направления ветра. Другое общепринятое приближение «мелкого моря» – $\beta \sim 0$, тогда направление дрейфового переноса и ветра совпадают. Наблюдения за дрейфовым течением в заливе показывают, что имеется отклонение вправо от направления ветра порядка 30–40°. Для формулы (1) это соответствует варианту приближения «моря промежуточной глубины», когда слой трения и глубина акватории одного порядка. В этом случае $\beta \sim 1$. Полагая $\beta = 1$, из формулы (1) получаем расчетную формулу для дрейфового потока

$$S \approx \frac{\tau}{if\rho} * (0,83 + 1,01i). \quad (3)$$

Дрейфовый поток отклоняется от направления ветра на угол 40°, а поверхностное течение в этом случае – вправо от направления ветра на 30°. Этот угол соответствует наблюдениям.

Проведем оценки для скорости северного ветра 10 м/с. (В системе СИ все оценки ниже). Из формулы (2) получаем $\tau = -0,15i \text{ Н/м}^2$. Отсюда дрейфовый поток

$$S = -1,5 * (0,83 + 1,01i) (\text{м}^2\text{с}^{-1}).$$

Таким образом, северный ветер генерирует дрейфовый поток порядка 1.5 т в секунду на один погонный метр, причем 55% этого потока направлено на юг с отклонением на запад. Поскольку водообмен залива с открытым морем имеет юго-западное направление, то до 90% «работы» северного ветра направлено на вынос воды из залива в Японское море.

Для оценки времени T выноса «столба» воды высотой $H \sim 20$ м при горизонтальном масштабе $L = 10$ км, получаем $T \approx 2LHS^{-1} \sim 3 * 10^5 \text{ с} \sim 3,5 \text{ сут}$. В этой формуле множитель 2 удваивает время замещения воды, поскольку требуется время для встречного потока в акваторию для заполнения вытесненного объема. В данной оценке в отличие от модели «глубокого моря» перенос потока – не поперек направления ветра, а практически по его направлению, с незначительным отклонением вправо. Отметим, что в расчетные формулы не входит полуэмпирический коэффициент турбулентного перемешивания, что уменьшает произвольность расчета вследствие подбора эмпирического коэффициента.

Таким образом, имеем осторожную оценку: осенью работа ветра северных направлений менее чем за неделю производит рециркуляцию воды в прилегающих к г. Владивостоку водах Амурского залива свежими водами Японского моря.

Эффект градиентного течения

Сразу отметим, что применение геострофического приближения в данном случае весьма ограничено, поскольку для залива с характерными горизонтальными деформациями $L = 10$ км нижняя оценка числа Россби более единицы. Это означает, что расчет циркуляции геострофическим методом не может соответствовать реально проходящим процессам. В данной ситуации горизонтальный перепад давления $\delta p / \delta y$ уравнивается инерционными силами. В итоге градиент силы давления в направлении север–юг также будут создавать скорость течения v , которое вынесет поверхностные воды из залива в Японское море. Из уравнения движения по оси y с учетом инерционного члена получаем

$$v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial p}{\partial y} \approx \frac{\delta p}{\rho} \frac{gH}{L}. \quad (4)$$

Отсюда оценка скорости движения верхних слоев воды с генеральным направлением на юг вследствие горизонтального градиента давления:

$$v = \sqrt{gH \frac{\delta p}{\rho}} \sim \sqrt{10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} * 5\text{м} * 0,25 * 10^{-3}} \approx 0,1 \text{ м/с}.$$

Здесь важно отметить, что градиентная сила и сила напряжения ветра «работают» в одном направлении и выносят поверхностные воды залива в море. Приведенные оценки свидетельствуют, что градиентные силы могут достигать одного порядка с силами касательного напряжения средних ветров. Однако касательное напряжение ветра растет как квадрат скорости ветра, формула (2), поэтому вклад сильных северных ветров в осенний период больше.

Приливной эффект

Покажем, что приливы вносят только второстепенный вклад в исследуемый процесс. Хотя приливные течения имеют реверсный характер, они тоже могут вносить свежую воду в залив. Энергетическая оценка показывает, что ветровой эффект может компенсировать приливы. Оценка плотности энергии приливной волны $E = 0,5 \rho \omega^2 A^2$, где ω , A – частота и амплитуда волны. Подставляя в формулу характерные значения по данным [12], получаем оценку $E \sim 10^{-6} \text{ кг/мс}^2$. Сравнение с энергетикой ветра показывает, что эффектом прилива на исследу-

емый процесс можно пренебречь. Из этого расчета следует, что сильный ветровой нагон–сгон может полностью компенсировать приливные течения.

Отметим, что эффект влияния рек, в частности р. Раздольная, также является величиной второго порядка малости по сравнению с ветром. Расход р. Раздольная [4] оценивается как $10^2 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. В то же время объем потока воды из залива в направлении север–юг имеет порядок не менее $10^4 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, расход воды реки – не более 1% от переноса морской воды вследствие дрейфа.

Заключение

Резюмируем результаты, полученные на основании данных наблюдений, модельных интегральных оценок значимых процессов.

- В осенний период муссонный ветер северного направления над заливом Петра Великого продуцирует дрейфовый поток в сторону Японского моря и выносит теплые воды из залива в открытое море. Свежие холодные воды Японского моря замещают воды залива. Происходит рециркуляция прилегающих к г. Владивостоку вод холодными солеными водами.

- В Амурском заливе угол отклонения вправо дрейфового течения и дрейфового потока от направления ветра имеет порядок $30\text{--}40^\circ$. В этом случае при моделировании ветровой циркуляции адекватно использовать приближение модели Экмана, когда масштаб перемешивания соответствует слою Экмана.

- Временной масштаб замены вод в прилегающей к г. Владивостоку акватории Амурского залива при скоростях ветра не менее 10 м/с северного направления – менее недели.

- В осенний период силы градиента давления также «работают» в направлении выноса поверхностных вод из залива. Приливной эффект, сток рек (Раздольная) как минимум на порядок слабее ветрового воздействия на исследуемый процесс.

- В зимний период рассматриваемый механизм в акватории Амурского залива ограничен, поскольку лед является экраном для генерации дрейфового течения.

Отметим прикладную важность для инженерных и биологических приложений по возможности планировать опасные (с точки зрения загрязнения акватории) мероприятия на конец лета–начало осени, когда осенняя естественная рециркуляция является дополнительным естественным фактором уменьшения антропогенной нагрузки на залив.

В заключение добавим, что дальнейшие более детальные натурные наблюдения и моделирование циркуляции позволят рационально планировать антропогенную нагрузку вдоль побережья с учетом сложной береговой черты залива Петра Великого.

Вклад авторов в статью: Т.Р. Кильматов – модельные и энергетические оценки, основной вклад в написание текста статьи, А.Ю. Лазарюк – наблюдения, сбор, обработка результатов экспериментов, рисунки, работа с текстом статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архив погоды г. Владивосток. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_во_Владивостоке (дата обращения: 04.02.2020).
2. Будаева В.Д., Зуенко Ю.И., Макаров В.Г. Структура и циркуляция вод бухты Суходол (Уссурийский залив, Японское море) // Известия ТИНРО. 2006. Т. 146. С. 226–234. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-i-tsirkulyatsiya-vod-buhty-suhodol-ussuriyskiy-zaliv-yaponskoe-more> (дата обращения: 13.02.2020).
3. Ванин Н.С., Мощенко А.В., Фельдман К.Л. Моделирование ветровых течений к северу от устья реки Туманной (залив Петра Великого Японского моря) // Биология моря. 1999. Т. 25, № 2. С. 93–94. URL: <http://www.ferhri.org/napravleniya-rabot/2017-06-25-23-13-34/2017-07-26-05-45-24/75-bibliografiya-po-okeanografii-zaliva-petra-velikogo.html> (дата обращения: 11.02.2020).
4. Вода России. URL: https://water-ru.ru/Водная_статистика (дата обращения: 02.03.2020).

5. Гомоюнов К.А. Гидрологический очерк Амурского залива и реки Суифун. Владивосток: Типография ДГУ, 1926. 22 с.
6. Григорьев Р.В., Зуенко Ю.И. Среднемноголетнее распределение температуры и солёности в Амурском заливе Японского моря // Известия ТИНРО. 2005. Т. 143. С. 179–188.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/srednemnogoletnee-raspredelenie-temperatury-i-solenosti-v-amurskom-zalive-yaponskogo-morya> (дата обращения: 13.01.2020).
7. Данченков М.А., Фельдман К.Л., Файман П.А. Температура и солёность вод залива Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока: сб. ст. Сер. 4 / ДВНИГМИ. Владивосток, 2003. С. 10–25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/spisok-osnovnyh-rekomenduemyh-publikatsiy-po-okeanografii-zaliva-petra-velikogo> (дата обращения: 04.02.2020).
8. Дубина В.А., Файман П.А., Пономарев В.И. Вихревая структура течений в заливе Петра Великого // Известия ТИНРО. 2013. Т. 173. С. 247–258.
9. Жабин И.А., Дмитриева Е.В., Кильматов Т.Р., Андреев А.Г. Влияние ветровых условий на изменчивость апвеллинга у побережья Приморья (северо-западная часть Японского моря) // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 58–67.
10. Краус Е. Взаимодействие атмосферы и океана. М.: Гидрометиздат, 1970. 294 с.
11. Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б. Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. 2013. № 4. С. 3–15.
12. Лазарюк А.Ю., Лобанов В.Б., Пономарев В.И. Эволюция термохалинной структуры вод Амурского залива в холодный сезон // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 59–70.
13. Лазарюк А.Ю., Смирнов С.В., Самченко А.Н. и др. Колебания поверхности Амурского залива в зимний период // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2018. № 4(37). С. 53–62. DOI.org/10.5281/zenodo.2008659
14. Пранц С.В., Пономарев В.И., Будянский М.В. и др. Лагранжев анализ перемешивания и переноса вод в морских заливах // Известия РАН. Физика океана и атмосферы. 2013. Т. 49, № 1. С. 91–106.
15. Савельева Н.И. Общая схема циркуляции вод Амурского и Уссурийского заливов по результатам численного моделирования. Деп. ВИНТИ № 2268-B89. Владивосток: ТОИ ДВНЦ, 1989. 29 с.
16. Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Звалинский В.И. и др. Сезонная гипоксия Амурского залива (Японское море) // Известия ТИНРО. 2011. Т. 165. С. 136–157.
17. Файман П.А. Расчёт диагностических течений в заливе Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока: сб. ст. Вып. 4 / ДВНИГМИ. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 26–33.
URL: <http://www.ferhri.org/images/stories/FERHRI/TrudiDVNIGMI/Tematicheskie/tematich4.pdf> (дата обращения: 07.02.2020).
18. Физика океана. Т. 2. Гидродинамика океана / ред. В.М. Каменкович, А.С. Монин. М.: Наука, 1978. 455 с.
19. Юрасов Г.И., Ванин Н.С., Рудых Н.И. Особенности гидрологического режима зал. Петра Великого в осенне-зимний период // Известия ТИНРО. 2007. Т. 148. С. 211–220.
20. Danchenkov M.A., Aubrey D.G., Feldman K.L. Oceanography of area close to the Tumannaya river mouth (the Japan Sea). J. Pacific Oceanography. 2003;1(1):61–69. URL: <http://www.ferhri.org/images/stories/FERHRI/PacificOceanography/povoln1.pdf> (дата обращения: 05.02.2020).
21. Fayman P.A., Ponomarev V.I. Diagnostic simulation of sea currents in the Peter the Great bay based on FERHRI oceanographic surveys. Pacific Oceanography. 2008;4(1–2):56–64.
22. Prants S.V., Budyansky M.V., Ponomarev V.I., et al. Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street. Ocean Modeling. 2011;38(1–2):114–125.
23. Vanin N.S., Moschenko A.V., Feldman K.L., Yurasov G.I. Simplified model of the wind-driven circulation with emphasis on distribution of the Tuman river solid run-off. Ocean Research. 2000;22(2):81–90. URL: <http://www.ferhri.ru/napravleniya-rabot/2017-06-25-23-13-34/2017-07-26-05-45-24/75-bibliografiya-po-okeanografii-zaliva-petra-velikogo.html> – 05.02.2020.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-11>

Kilmatov T., Lazaryuk A.

TALGAT KILMATOV, Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Professor,
ORCID: 0000-0002-0574-1452, ScopusID: 6506876958, e-mail: kilmatov.tr@dvfu.ru
Far Eastern Federal University

ALEXANDER LAZARYUK, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher.
ORCID: 0000-0003-4231-9653, ResearcherID: AAH-2203-2019,
ScopusID: 6507304837, e-mail: lazaryuk@poi.dvo.ru
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS
Vladivostok, Russia

Water recirculation in the Peter the Great Bay of the Sea of Japan (the Eastern Sea) due to autumn monsoon

Abstract: The data of field observations (2010, 2019) and model estimates it is shown that during the autumn monsoon, the waters of Amursky Bay are rapidly replaced with fresh cold water of the Japan Sea. The time scale of the process is several days. Comparative energy estimates of the wind, thermohaline, and tidal effects on the process are given. The main reason is the removal of water from the bay as a result of the drift current generated by the winds of the northern directs. The importance of the effect is seasonal natural cleaning of the water areas surrounding the city of Vladivostok.

Keywords: Amursky Bay, Peter the Great Bay, sea circulation, autumn-winter monsoon, water recirculation.

REFERENCES

1. Weather archive in Vladivostok. URL: https://rp5.ru/Weather_archive_in_Vladivostok – 04.02.2020.
2. Budaeva V.D., Zuenko Yu.I., Makarov V.G. The structure and circulation of the waters of Sukhodol Bay (Ussuri Bay, Japan Sea). *Izvestiya TINRO*. 2006;146:226–234. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-i-tsirkulyatsiya-vod-buhty-suhodol-ussuriyskiy-zaliv-yaponskoe-more> – 13.02.2020.
3. Vanin N.S., Moshchenko A.V., Feldman K.L. Modeling of wind currents north of the mouth of the Tumannaya River (Peter the Great Bay of the Japan Sea). *Sea Biology*. 1999;25(2):93–94. URL: <http://www.ferhri.org/napravleniya-rabot/2017-06-25-23-13-34/2017-07-26-05-45-24/75-bibliografiya-po-okeanografii-zaliva-petra-velikogo.html> – 11.02.2020.
4. Water of Russia. Popular science encyclopedia. URL: https://water-rf.ru/Water_statistics – 03.04.2020.
5. Gomoyunov K.A. Hydrological sketch of the Amur Bay and the Suifun River. Vladivostok, Printing house of DGU, 1926, 22 p.
6. Grigoriev R.V., Zuenko Yu.I. Average long-term distribution of temperature and salinity in the Amur Bay of the Japan Sea. *Izvestiya TINRO*. 2005;143:179–188. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/srednemnogoletnee-raspredelenie-temperatury-i-solenosti-v-amurskom-zalive-yaponskogo-morya> – 13.01.2020.
7. Danchenkov M.A., Feldman K.L., Fayman P.A. Temperature and salinity of the waters of Peter the Great Bay. *Hydrometeorology and ecology of the Far East. Thematic issue DVNIIGMI*.

- Ser. 4. Vladivostok, Dalnauka, 2003, p. 10–25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/spisok-osnovnyh-rekomenduemyh-publikatsiy-po-okeanografii-zaliva-petra-velikogo> – 04.02.2020.
8. Dubina V.A., Fayman P.A., Ponomarev V.I. Vortex structure of currents in Peter the Great Bay. *Izvestiya TINRO*. 2013;173:247–258.
9. Zhabin I.A., Dmitrieva E.V., Kilmatov T.R., Andreev A.G. Influence of wind conditions on upwelling variability off the coast of Primorye (northwestern part of the Japan Sea). *Meteorology and Hydrology*. 2017;3:58–67.
10. Kraus E. The interaction of the atmosphere and the ocean. Leningrad, Gidrometizdat, 1970, 294 p.
11. Ladychenko S.Yu., Lobanov V.B. Synoptic eddies in the area of Peter the Great Bay according to satellite data. *Earth Research from Space*. 2013;4:3–15.
12. Lazaryuk A.Yu., Lobanov V.B., Ponomarev V.I. Evolution of the thermohaline structure of the waters of the Amur Bay in the cold season. *Vestnik FEB RAS*. 2013;6:59–70.
13. Lazaryuk A.Yu., Smirnov S.V., Samchenko A.N. et al. Oscillations of the surface of the Amur Bay in winter. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2018;4(37):53–62. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.2008659
14. Prants S.V., Ponomarev V.I., Budyansky M.V. et al. Lagrange analysis of mixing and water transfer in sea bays. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Ocean and Atmosphere*. 2013;49(1):91–106.
15. Savelyeva N.I. General scheme of water circulation in the Amur and Ussuri bays according to the results of numerical modeling. Dep. VINITI No. 2268-B89. Vladivostok. TOI DVNC, 1989, 29 p.
16. Tishchenko P.Ya., Lobanov V.B., Zvalinsky V.I. et al. Seasonal hypoxia of the Amur Bay (the Japan Sea). *Izvestiya TINRO*. 2011;165:136–157.
17. Fayman P.A. Calculation of diagnostic currents in Peter the Great Bay. *Hydrometeorology and ecology of the Far East*. Vol. 4. Vladivostok, Dalnauka, 2003, p. 26–33. URL: <http://www.ferhri.org/images/stories/FERHRI/TrudiDVNIGMI/Tematicheskie/tematich4.pdf> – 07.02.2020.
18. *Physics of the ocean*. Vol. 2. Ocean hydrodynamics. Ed. Kamenkovich V.M., Monin A.S. M., Nauka, 1978, 455 p.
19. Yurasov G.I., Vanin N.S., Rudykh N.I. Features of the hydrological regime of the bay. Peter the Great in the autumn-winter period. *Izvestia TINRO*. 2007;148:211–220.
20. Danchenkov M.A., Aubrey D.G., Feldman K.L. Oceanography of area close to the Tumannaya river mouth (the Japan Sea). *Pacific Oceanography*. 2003;1(1):61–69. URL: <http://www.ferhri.org/images/stories/FERHRI/PacificOceanography/povolln1.pdf> – 05.02.2020
21. Fayman P.A., Ponomarev V.I. Diagnostic simulation of sea currents in the Peter the Great bay based on FERHRI oceanographic surveys. *Pacific Oceanography*. 2008;4(1–2):56–64.
22. Prants S.V., Budyansky M.V., Ponomarev V.I. et al. Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street. *Ocean Modeling*. 2011;38(1–2):114–125.
23. Vanin N.S., Moschenko A.V., Feldman K.L., Yurasov G.I. Simplified model of the wind-driven circulation with emphasis on distribution of the Tuman river solid run-off. *Ocean Research*. 2000;22(2):81–90. URL: <http://www.ferhri.ru/napravleniya-rabot/2017-06-25-23-13-34/2017-07-26-05-45-24/75-bibliografiya-po-okeanografii-zaliva-petra-velikogo.html> – 05.02.2020.