
**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

УДК 556.54:551.468.6 (265.53:282.257)

**ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЛАГУННО-РУСЛОВОМ
ЭСТУАРИИ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА
(НА ПРИМЕРЕ УСТЬЯ РЕКИ БОЛЬШОЙ, ЗАПАДНАЯ КАМЧАТКА)¹**

© 2019 г. С. Л. Горин^{1,*}, А. А. Попрядухин², М. В. Коваль³

¹Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
Москва 107140 Россия, ул. Верхняя Красносельская, 17

*E-mail: gorinser@mail.ru

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва 119991 Россия, Ленинские горы, Географический факультет

³ Камчатский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
683000 Петропавловск-Камчатский Россия, ул. Набережная, 18

Поступила в редакцию 06.09.2017 г.

После доработки 12.12.2017 г.

Принята к публикации 26.12.2017 г.

На основе результатов многолетних полевых работ подробно рассмотрены вопросы формирования гидрологического режима лагунно-руслового эстуария р. Большой, находящегося в Камчатском крае — одном из самых удаленных и малоизученных регионов России. Приведено большое количество фактического материала, характеризующего не только сам эстуарий и происходящие в нем процессы, но и природные условия, в которых он существует.

Ключевые слова: устьевая область реки, эстуарий, гидрология, водные массы, смешение вод, Камчатка.

DOI: 10.31857/S0321-05964612-13

За более чем полувековую историю развития устьевой науки в России и в сопредельных странах изучено большое количество устьевых объектов, в том числе эстуариев [12, 13]. Однако эти исследования почти не затронули Тихоокеанское побережье России в целом и берега Камчатки в частности. Поэтому в научной литературе пока еще мало сведений о лагунно-русловых эстуариях, которые широко распространены в этом регионе [6], но почти не встречаются в других частях России. В связи с этим новые знания об эстуариях Камчатки могут быть полезны как для решения практических задач, связанных с использованием богатых водных и биологических ресурсов этого края, так и для развития устьевой науки в целом.

Статья посвящена эстуарию р. Большой (Западная Камчатка). На примере этого объекта показаны характерные черты гидрологических

процессов в лагунно-русловых эстуариях в теплый период года. В статье приводится большой объем фактического материала, позволяющий читателям не только оценить обоснованность выводов авторов, но и составить собственное представление об эстуарии и происходящих в нем процессах. Исследования в этом объекте проводились в рамках многолетней программы по комплексному изучению эстуариев Камчатского края, реализуемой авторами с 2002 г. [6, 10].

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭСТУАРИИ р. БОЛЬШОЙ

Эстуарий р. Большой находится на западном побережье Камчатки, в устье одной из крупнейших рек региона (рис. 1). Он представляет собой полузамкнутый водный объект, вытянутый вдоль берега Охотского моря на 34 км (по состоянию на 2005 г.) и на всем своем протяжении отделенный от моря песчано-галечной пересыпью — Октябрьской косой. По происхождению и морфодинамике эстуарий р. Большой следует считать лагуной [6, 9]. В то же время его гидроло-

¹ Работа выполнена в рамках научных программ ВНИРО и КамчатНИРО при финансовой поддержке проекта ПРООН-ГЭФ “Сохранение биоразнообразия лососевых Камчатки и их устойчивое использование” и РФФИ (проект 17-05-01224).

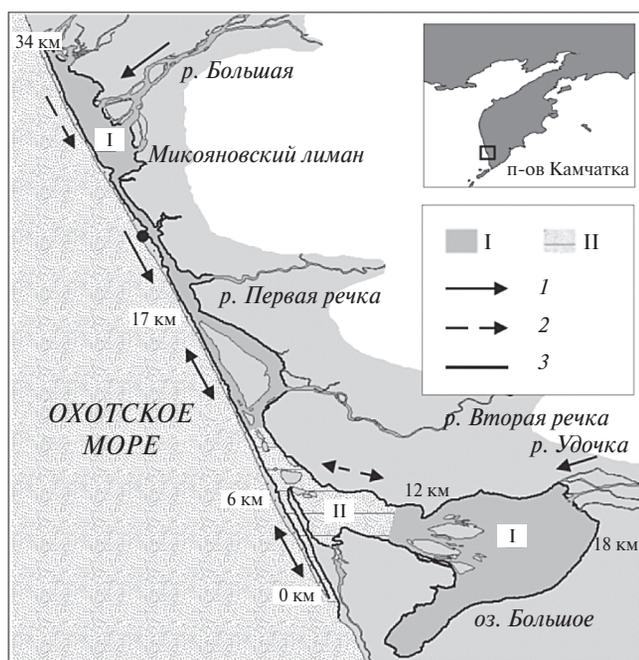


Рис. 1. Эстуарий р. Большой и его районирование по гидрологическим условиям в теплый период года (показана ситуация, характерная для спада половодья и летней межени в сочетании с сизигийными приливами): I – зона распространения речных вод; II – зона смешения водных масс; 1 – стоковые и стоково-приливные течения в руслах водотоков; 2 – стоковые и стоково-приливные течения в водоемах; 3 – граница эстуария; 6 км, 10 км и т.д. – расстояния от устья эстуария (0 км).

гический режим определяется результатом взаимодействия речных и морских факторов в русле эстуарного водотока. Поэтому авторы статьи относят этот эстуарий к типу “лагунный”, подтипу “лагунно-русловой” [6, 14]. На западном побережье Камчатки находится 15–20 объектов этого подтипа [6], но ни один из них пока не изучен.

В состав эстуария р. Большой входят два водоема — Микояновский лиман и оз. Большое, а также эстуарный водоток, через который водоемы сообщаются с Охотским морем. Средняя глубина в водоемах очень мала: при максимальном годовом уровне воды она <2 м, обычно же

<1 м. Максимальные глубины в эстуарном водотоке достигают 5–7 м. Устье эстуарного водотока преграждается баром, глубины над которым в отлив <0.5 м. Некоторые морфометрические характеристики эстуария приведены в табл. 1.

Анализ архивных документов и карт за почти трехсотлетнюю историю освоения устья р. Большой показал, что Октябрьская коса непрерывно удлиняется в южном направлении (>26 км за последние 250 лет, ~150 м/год в XX в.) [4, 9]. Вследствие этого процесса изменяются как морфологическое строение эстуария, так и гидрологический режим его отдельных частей. В первой половине XVIII в. нынешний Микояновский лиман непосредственно соединялся с морем и, скорее всего, был осолонен, а оз. Большое еще не входило в состав эстуария и было пресным [3]. К середине XX в. коса удлинилась настолько, что озеро присоединилось к эстуарию и осолонилось, а лиман, наоборот, опреснился. Затем по мере удлинения косы озеро все больше и больше опреснялось. К настоящему времени осолоненные воды проникают только в ближайшую к эстуарному водотоку часть озера (на ~1/3 его акватории) и только в краткие периоды времени, близкие к высоким полным водам (речь идет о теплом периоде года). Подобное явление — изменение гидрологического режима из-за активной морфодинамики блокирующей формы — характерно и для других лагунно-русловых эстуариев Камчатки [6, 8].

Помимо р. Большой в эстуарий впадают реки Амчигача, Первая речка, Вторая речка, Набережная и Удочка. Расчеты с использованием гидрологической аналогии показали, что подавляющая часть пресной воды поступает в эстуарий из двух рек — Большой и Удочки (соответственно ~89 и 10% суммарного речного стока). Водному режиму этих рек свойственны устойчивая зимняя межень (с декабря по апрель), весенне-летнее половодье (с мая по июль с пиком в июне) и летне-осенний паводочно-меженный период (в августе–ноябре).

Таблица 1. Морфометрические характеристики эстуария р. Большой (по состоянию на 2005 г.)

Водный объект	Площадь, км ²	Длина, км	Ширина (ср / макс.), км
Микояновский лиман	8.5	8	1.1 / 1.7
оз. Большое	45.2	17	2.7 / ~5
Эстуарный водоток	15.0	26	0.6* / 1.1*
Весь эстуарий	68.8	34	—

* С учетом разветвления около о. Томилова.

В устье р. Большой среднемноголетний расход воды составляет $\sim 320 \text{ м}^3/\text{с}$, средний максимальный расход половодья $\sim 1200 \text{ м}^3/\text{с}$, средний минимальный расход в осеннюю и зимнюю межень $\sim 250 \text{ м}^3/\text{с}$ и $\sim 50 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. По архивным данным Камчатского Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС), величина сезонных колебаний уровня воды в нижнем течении реки — от 1.5 до 2 м. Среднегодовая температура речной воды — $\sim 4.4^\circ\text{C}$; средняя температура в июле и августе — $\sim 10^\circ\text{C}$; через 0.2°C температура воды переходит в конце марта и конце ноября. Минерализация речной воды — 30–40 мг/л, среднемноголетняя мутность — $\sim 11 \text{ г}/\text{м}^3$.

Приливы у Октябрьской косы неправильные — полусуточные, величиной до 2.6 м в сизигию и до 1.1 м в квадратуру. Ежегодно, чаще всего в октябре—декабре, в районе косы наблюдаются значительные нагоны: расчетное превышение нагонного уровня над приливным 1 раз в год может достигать 115 см, а 1 раз в 50 лет — 170 см [2]. Это явление часто приводит к переливанию морской воды через Октябрьскую косу, а иногда и к разрушению находящихся на ней построек [2, 11].

По архивным данным Камчатского УГМС (1976–1991 гг.), среднемноголетняя температура морской воды в районе пос. Октябрьского $\sim 3.7^\circ\text{C}$; среднемесячная температура воды в феврале опускается до -1.7°C , а в конце августа — начале сентября повышается до 11.0°C . Среднемесячная соленость морской воды изменяется от 28–29‰ в период повышенного речного стока в июне—октябре до 30–32‰ в период пониженного стока с ноября по май. В отдельные дни теплого периода года (на пиках речного половодья и паводков) соленость морской воды у берега Октябрьской косы в 22 км от устья эстуария может понижаться до 20–22‰. Штилей у берега Октябрьской косы почти не бывает. В течение года здесь преобладает нормальное к берегу волнение с З и ЮЗ, реже бывает волнение с СЗ (в этом случае луч волны распространяется от основания к оконечности косы). Морские течения в районе Октябрьской косы — это результат сложного взаимодействия приливных, дрейфовых и волновых факторов. В приустьевой зоне — течения реверсивные: в приливную фазу они направлены вдоль косы на С, а в отливную фазу — на Ю. Расчеты авторов статьи (по данным годовых наблюдений Дальморнии проекта [15]) показали, что с мая по сентябрь (в период слабой ветровой активности) средняя величина

реверсивных течений составляет 0.2–0.3, а максимальная — до 0.5–1.0 м/с. Результирующее течение направлено на Ю, в теплое время года его средняя величина равна 0.05 м/с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К настоящему времени в России подробно изучен лишь один лагунно-руслевой эстуарий, который находится в устье р. Камчатки [7, 8]. В отношении гидрологического режима эстуария р. Большой до настоящих исследований были известны только отрывочные факты (хронология работ и перечень источников представлены в [4, 5]).

В основу настоящей статьи положены материалы четырех экспедиций, проведенных в 2002–2005 гг. (09–27 июня и 08–09 августа 2002; 10 июня — 2 августа 2003; 16–24 августа 2004; 20 июня — 2 августа 2005 гг.). Под теплым периодом года в статье понимается период времени с первой половины мая до второй половины октября, когда на акватории эстуария отсутствуют какие-либо ледовые явления, а температура воды в его пресноводной части превышает $3\text{--}4^\circ\text{C}$ — пороговую величину для физиологических процессов у хладнокровных животных, обитающих в пресных водах, например у молоди лососевых рыб [16]. Несмотря на то, что экспедиции продолжались только три месяца календарного лета, наблюдениями были охвачены почти все возможные в теплый период года сочетания величин водного стока р. Большой (от 350 до $1450 \text{ м}^3/\text{с}$) и приливов в море (от 1.1 до 2.6 м). В охваченный наблюдениями период не попала лишь ситуация с очень низким речным стоком ($250\text{--}300 \text{ м}^3/\text{с}$), которая может наблюдаться в маловодные годы на исходе осени — с середины сентября до середины октября.

Полевые исследования выполнялись в соответствии с принятыми в гидрологии устьев рек методами [1]. Они были нацелены на изучение пространственно-временной изменчивости уровня (H), температуры (T), солености (S), скорости (V) и направления течения воды, а также на определение морфометрических характеристик водных объектов. Для перемещения по акватории эстуария использовалась лодка с подвесным мотором. Материалы режимных наблюдений в бассейне р. Большой и в прибрежной части Охотского моря были предоставлены Камчатским УГМС.

Уровень воды. В 2002 г. исследования были рекогносцировочными, поэтому уровень воды измерялся эпизодически на четырех речных постах. В последующие годы использовались поплавковые и гидростатические самописцы. В 2003 и 2005 гг. было установлено 7 и 5 приборов соответственно, которые равномерно распределялись по всей площади эстуария от его устья до вершины. Три «опорных» прибора работали 3–6 недель (иногда с короткими перерывами). Остальные самописцы действовали 1–2 недели. В 2004 г. наблюдения проводились только в оз. Большом: в нем 5 самописцев работали ~1 неделю. В большинстве случаев отметки нулей графиков постов с помощью нивелирования были привязаны к высотным пунктам государственной геодезической сети. Для остальных постов увязка проводилась по отметкам полных вод. Точность измерения H самописцами — 1–2 см, точность отсчета времени — 10–15 мин.

Температура и соленость воды измерялись гидрологическими зондами Hydrolab MiniSonde 4a (в 2002–2003 гг.) и YSI–600XLM (в 2004–2005 гг.). Точность измерения температуры воды — 0.1°C, солености — от 0.5‰ в диапазоне 0–2‰ до 0.1‰ в диапазоне 2–33‰. В зависимости от решаемой задачи T и S измерялись либо с заякоренной лодки в течение 25 ч (суточные станции), либо с помощью двух и более продольных гидрологических съемок, повторяющихся в течение одного приливного цикла (всего почти 20 съемок). То и другое делалось в сизигийные и квадратурные приливы, при высоком и низком речном стоке. Гидрологические съемки охватывали всю зону смещения (ЗС) от устья эстуария до области распространения пресных вод. Количество станций и расстояния между ними в каждом случае определялись исходя из сложившейся гидрологической обстановки.

Скорость и направление течений определялись с помощью морской вертушки с магнитным компасом одновременно с измерениями T и S на суточных станциях.

Водный сток рек. В пяти км от места впадения р. Большой в эстуарий (вне зоны влияния приливов) был организован уровенный пост, который работал во время всех экспедиций. Здесь в 2002–2005 гг. на подъеме, пике и спаде половодья, а также в межень было измерено несколько расходов воды (Q). Измерения были сделаны стандартным методом (по тросу с помощью вертушки ГР-21 на 3–5-ти вертикалях). Затем

для этого створа была построена зависимость $Q = f(H)$, позволившая рассчитать гидрографы р. Большой в замыкающем створе для теплых периодов 2002–2005 гг. В других притоках эстуария измерения расходов воды были сделаны по одному разу (для определения соотношения между их суммарным стоком и стоком р. Большой).

Глубины в эстуарии измерены с помощью эхолота «GARMIN GPSMAP 188 Sounder». Точность определения глубины — 5–10 см, планового положения промерных точек — 5–10 м. В эстуарии промеры делались по косым галсам и поперечникам, расстояние между которыми не превышало 100–300 м. Все измеренные глубины приведены к единой системе отсчета.

При анализе полевых данных применялись различные геоинформационные, статистические и количественные методы, а также метод географического описания. Количественные методы, использованные в работе, можно разделить на три подхода: эмпирический (поиск зависимостей в графическом или аналитическом выражении на основе полевых данных, например T – S -анализ водных масс); балансовый (расчеты на основе балансовых соотношений вещества — в данном случае воды и солей) и гидродинамический (расчет отдельных характеристик по уравнениям гидравлики).

В теоретическом отношении статья опирается на представления об определении, классификации и районировании эстуариев, изложенные в [14].

КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ

Сезонные колебания уровня воды в эстуарии р. Большой в теплую часть года тесно связаны с соответствующей изменчивостью речного стока (рис. 2). Из-за расплывания волн речного половодья и паводков величина этих колебаний уменьшается от верхней границы эстуария к нижней (табл. 2). При этом сезонные колебания уровня воды в Микояновском лимане больше, чем в р. Большой, благодаря влиянию приливов.

Под действием приливов средний за лунные сутки уровень воды в эстуарии р. Большой изменяется с полумесячной периодичностью. В периоды пониженного речного стока эти колебания хорошо заметны по всему эстуарию и составляют ~0.2 м; в периоды повышенного речного стока они могут затушевываться волнами половодья и паводков. Общая закономерность для всего

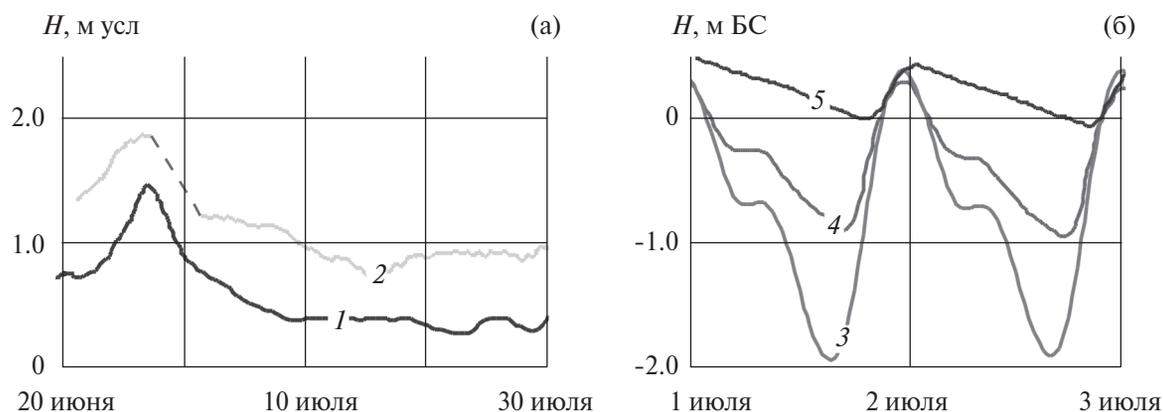


Рис. 2. Сезонные (а) и суточные (б) изменения уровня воды в эстуарии р. Большой (по данным наблюдений 2005 и 2003 гг. соответственно): 1 – в р. Большой перед ее впадением в эстуарий; 2 – в 8.5 км от устья эстуария (приливные колебания уровня исключены методом 25-часового скользящего осреднения); 3 – в Охотском море; 4 – в 3.6 км от устья эстуария; 5 – в 26 км от устья эстуария, БС (здесь и далее в тексте) — измерение в Балтийской системе высот.

Таблица 2. Характеристики сезонных изменений уровня воды в эстуарии р. Большой в теплый период года

Водный объект	Отметки среднего приливного уровня воды в периоды сизигийных приливов, м БС		Сезонное изменение уровня, м
	при $Q = 1450 \text{ м}^3/\text{с}^*$ (26.06.2005)	при $Q = 350 \text{ м}^3/\text{с}^*$ (15.07.2003)	
р. Большая (Усть-Большерецк)	-	-	1.8
Микояновский лиман (26 км ^{**})	2.1	0.0	2.1
Эстуарный водоток (3.7 км)	0.6	-0.4	1.0
оз. Большое (о. Птичий, 13 км)	0.8	0.1	0.7

* р. Большая.

** Расстояние от оконечности косы.

эстуария такова: во время сизигийных приливов средний приливный уровень выше, чем в периоды квадратурных приливов (при постоянном речном стоке). Это объясняется тем, что в сизигийные приливы эстуарий наполняется водой, а в квадратурные приливы его объем частично сбрасывается.

Морскими приливами в эстуарии р. Большой возбуждаются значительные суточные и полусуточные колебания уровня воды, величина которых уменьшается по мере продвижения от устья к вершине эстуария (рис. 2; табл. 3). Помимо этого, размах колебаний уровня зависит от величин речного стока и морских приливов: в межень суточные колебания уровня воды больше, чем в половодье, а в сизигии — больше, чем в квадратуры.

По особенностям трансформации приливной волны в эстуарии р. Большой можно выделить

несколько характерных участков: устье эстуария (район устьевого бара), эстуарный водоток и эстуарные водоемы.

В районе устьевого бара приливная волна теряет от 15 (в межень) до 40% (на пике половодья) своей величины, при этом все потери приходятся на период низких малых вод (рис. 2). Это можно объяснить следующим образом. Когда уровень моря выше некоторой критической величины, приливная волна свободно проникает в эстуарий. Но когда уровень моря становится ниже критической отметки, проникновению приливной волны препятствуют малые глубины над устьевым баром и напор потока, вытекающего из устья эстуария. Поскольку критическая величина уровня моря зависит от расхода стоково-отливного потока (при одной и той же глубине над устьевым баром большему расходу потока соответствует большая скорость его течения),

Таблица 3. Характеристики приливных колебаний уровня воды в эстуарии р. Большой в теплый период года

Водный объект	Расход воды р. Большой, м ³ /с			
	1450	950	625	350
Величины квадратурных и сизигийных приливов, м				
Охотское море	1.1–2.6			
Эстуарный водоток (3.7 км*)	0.3–0.7	0.4–1.0	0.5–1.3	0.8–2.0
Микояновский лиман (26 км)	0	0	0.1–0.2	0.2–0.5
оз. Большое (о. Птичий, 13 км)	0.1–0.2	0.2–0.4	0.2–0.5	0.2–0.4
Коэффициенты приливов**				
Охотское море	1.0			
Эстуарный водоток (3.7 км)	0.25	0.37	0.49	0.75
Микояновский лиман (26 км)	0	0	0.09	0.20
оз. Большое (о. Птичий, 13 км)	0.06	0.15	0.21	0.15

*Расстояние от оконечности косы.

**В квадратурные и сизигийные приливы коэффициенты оказались одинаковыми.

регулирующая роль устьевого бара в половодье намного заметнее, чем в межень, а на пике половодья больше, чем на его подъеме или спаде.

В эстуарном водотоке приливная волна трансформируется под действием встречного стоково-отливного потока. В отличие от других участков эстуария, интенсивность затухания приливной волны в водотоке слабо изменяется по сезонам и составляет 0.4–0.5 см на каждые 100 м длины русла. Отсюда следует важная для всего эстуария закономерность: из-за неизменной пропускной способности эстуарного водотока дальность проникновения приливов в эстуарии р. Большой определяется величиной затухания приливной волны в районе устьевого бара, что типично для подобных объектов [13].

В оз. Большом и Микояновском лимане из-за растекания вод на обширных мелководьях приливная волна затухает интенсивней, чем в эстуарном водотоке. В межень глубина на большей части водоемов не превышает 1 м, поэтому интенсивность затухания приливной волны в этот период максимальна (в оз. Большом – 2.4 см на 100 м при $Q = 350$ м³/с). В половодье увеличение глубины (табл. 2) приводит к уменьшению интенсивности затухания приливных колебаний (в оз. Большом – 0.93 см на 100 м при $Q = 625$ м³/с и 0.54 см на 100 м при $Q = 1450$ м³/с).

И в эстуарном водотоке, и в эстуарных водоемах трансформация приливной волны проявляется в запаздывании времени наступления

ее экстремумов. При этом у полных вод сдвиг по времени меньше, чем у малых вод (рис. 2). Поэтому приливная волна в своем движении к вершине эстуария перекашивается: прилив становится короче, а отлив продолжительнее (повышение уровня воды в море продолжается 8–9 ч, а в озере и лимане — ≤5–6 ч). Перекашивание приливной волны приводит к тому, что в отдельные периоды приливного цикла уровень воды в море и в эстуарных водоемах меняется в противофазе, что особенно заметно при полусуточных квадратурных приливах. При сезонном уменьшении стока р. Большой асимметрия приливов в эстуарном водотоке уменьшается, а в лимане и озере, наоборот, увеличивается. В первом случае проявляется уменьшение сопротивления стоково-отливного потока над устьевым баром, а во втором — возрастание потерь приливной волны на мелководьях в эстуарных водоемах.

Большой интерес вызывает оценка вклада приливной составляющей в формирование сезонных колебаний уровня воды в эстуарии. Для этого по данным полевых измерений построены продольные профили среднего приливного уровня воды в эстуарном водотоке при высоком и низком речном стоке. Их сравнили с кривыми свободной поверхности, рассчитанными по методу Н.Н. Павловского [17]. Оказалось, что средний приливный уровень воды в эстуарном водотоке всегда выше стокового, причем величина этого превышения изменяется в зависимости от водного стока р. Большой (больше сток — больше превышение), а также от расстояния от устья

эстуария (ближе к морю заметней превышение). Благодаря этому морские приливы вносят существенный вклад в сезонные колебания уровня воды внутри эстуария, “добавляя” к их стоковой составляющей 0.3–0.5 м (в Микояновском лимане это ~15% общей величины сезонных колебаний уровня, в оз. Большом ~40, а в эстуарном водотоке – от 15 в вершине до 100% в устье).

ВОДООБМЕН И ВОДООБНОВЛЕНИЕ В ЭСТУАРИИ

Водообмен через морскую границу эстуария двусторонний, при этом его характеристики зависят как от речных, так и от морских факторов. В теплый период года морская вода проникает в эстуарий только во второй половине приливной фазы, а в отлив она полностью стекает в море. При этом объем притока морской воды обратно пропорционален величине водного стока рек и прямо пропорционален величине морских приливов, следовательно, изменяется с сезонной и полумесячной периодичностью. На рис. 3 видно, что при $Q < 1000 \text{ м}^3/\text{с}$ морская вода с каждым приливом проникает в эстуарий; при $1000 \text{ м}^3/\text{с} < Q < 1500 \text{ м}^3/\text{с}$ это происходит лишь в сизигии, а при $Q > 1500 \text{ м}^3/\text{с}$ это явление отсутствует вовсе. В данном случае эмпирические данные подтверждают теоретические положения: расчет критического расхода воды по формуле $Q_{\text{кр}} = Bh(gh\Delta\rho/\rho_{\text{ср}})^{0.5}$ (где B и h – соответственно средняя ширина и глубина русла эстуария на участке проникновения осолоненных вод, $\Delta\rho$ – разность плотности морской и речной воды, $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность по всей глубине русла, g – ускорение свободного падения [13]) дает величину ~1550 $\text{м}^3/\text{с}$. Учитывая это, а также харак-

теристики водного режима р. Большой, можно сделать вывод, что присутствие морской воды в ее эстуарии – явление обычное, оно наблюдается ежесуточно в течение всего теплого периода года и ограничивается только в короткие периоды на пиках половодья и наиболее значительных паводков. Из-за отсутствия наблюдений зависимости на рис. 3 нельзя распространить на область малых речных расходов, характерных для осенней межени в маловодные годы. Но, учитывая то, что в эстуарии р. Большой дальность проникновения осолоненной воды при $Q < 400\text{--}600 \text{ м}^3/\text{с}$ остается постоянной, можно предположить, что при малом речном стоке объем притока морской воды близок к верхним пределам, показанным на рис. 3.

Приливный характер водообмена между эстуарием и морем отражается на рельефе нижней части эстуарного водотока (от входа в оз. Большое до устья эстуария): при неизменной ширине русла водотока отметки его дна заметно понижаются в сторону моря. Это объясняется двумя взаимосвязанными причинами. За лунные сутки через поперечное сечение нижней части эстуарного водотока проходит не только речная вода, но и морская, которая в приливную фазу проникает из моря в эстуарий, а в отливную стекает обратно в море. При этом количество морской воды, участвующей в водообмене, уменьшается при увеличении расстояния от моря (табл. 4). Кроме этого, движение вод в приморской части эстуарного водотока неравномерно: в моменты смены направлений приливных течений оно останавливается, а ближе к полным и малым водам заметно ускоряется. Поэтому максимальный стоково-отливный расход воды превос-

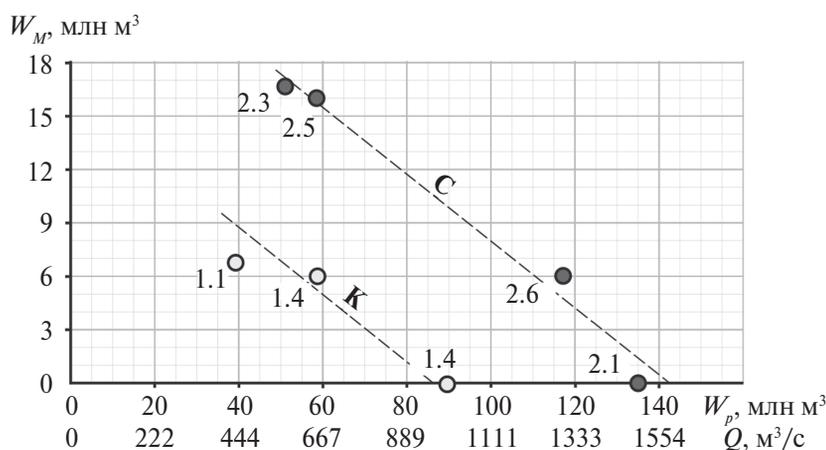


Рис. 3. Зависимость объема притока морских вод в эстуарии р. Большой от величин речного стока и приливов в Охотском море в теплый период года: подписи рядом с точками соответствуют величинам больших приливов в море, м; С – сизигийные приливы; К – квадратурные приливы; W_m и W_p – объемы морской и речной воды, поступившие в эстуарий за приливные сутки (25 ч); Q – суммарный речной расход (реки Большая и Удочка).

Таблица 4. Характеристики водообмена через поперечные сечения эстуария в период с 30 июня по 10 июля 2003 г. (B — большая величина прилива в море; Q — суммарный речной расход (реки Большая и Удочка); $Q_{\text{ср эст}}$ — средний за 25 ч модуль расхода воды в эстуарии (вне зависимости от направления течения воды); $Q_{\text{макс эст}}$ — максимальный сток-отливный расход воды в эстуарном водотоке; C — сизигийные приливы; K — квадратурные приливы)

Приливы	B , м	Q , м ³ /с	Расстояние от устья эстуария, км			
			4.5	22	4.5	22
			$Q_{\text{ср эст}}/Q_p$, количество раз		$Q_{\text{макс эст}}/Q_p$, количество раз	
C	2.3	564	1.7	1.0	2.6	1.3
K	1.1	435	1.4	1.0	2.8	1.2

Таблица 5. Относительные объемы поступления вод в эстуарий р. Большой

Дата	Приливы	B , м	Q , м ³ /с	Доли речных и морских вод в суммарном объеме поступивших вод, %
24–25 июня 2005	C	2.6	1300	95 и 5
02 июля 2005	K	1.4	990	100 и 0
22–23 июля 2005	C	2.5	650	79 и 21
28–29 июля 2005	K	1.4	650	91 и 9
30 июня – 01 июля 2003	C	2.3	564	75 и 25
08–09 июля 2003	K	1.1	435	85 и 15

ходит сток-отлив и величина этого превышения закономерно увеличивается от вершины эстуарного водотока к его устью (табл. 4). В итоге, для нормального пропуска сток-отливных расходов воды площадь поперечного сечения эстуарного водотока должна увеличиваться по направлению к морю, что в данном случае проявляется увеличением его глубины. В этом прослеживается аналогия с воронкообразными эстуариями, в которых участие морской воды в водообмене приводит к формированию устьевых расширений [13].

Соотношение степеней влияния речных и морских факторов на водообмен в эстуарии можно оценить по долям притока речных и морских вод в приходной части его водного баланса (табл. 5). В теплый период года приток речных вод всегда больше притока морских вод, т.е. влияние первого фактора более значимо, хотя и не подавляюще: в летнюю межень при сизигийных приливах объем притока морских вод достигает 1/3 суточного притока речных вод. Соотношение долей притока речных и морских вод изменяется с сезонной и полумесячной периодичностью, что отражается на всех гидрологических процессах внутри эстуария.

О результирующей водного баланса эстуария р. Большой можно судить по изменениям уровня воды внутри него. Она изменяется с сезонной и полумесячной периодичностью. На подъеме половодья и паводков эстуарий наполняется речной водой (в сизигии более интенсивно, в квадратуры менее), а на спаде сб-рабатывается (в квадратуры больше, а в сизигии меньше). При невысоком и стабильном речном стоке в летнюю межень эстуарий наполняется речной водой в периоды сизигий, а сб-рабатывается в квадратуры.

Из-за большой величины суточного притока воды в теплое время года вода в эстуарии р. Большой полностью обновляется не более чем за 1–2 сут. В целом, для исследуемого объекта оправдано применение модели водоёма-вытеснителя, в которой каждая новая порция воды вытесняет старую, не смешиваясь с ней.

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ

Анализ $T-S$ -диаграмм (рис. 4) показал, что в эстуарии р. Большой взаимодействуют между собой только две первичные водные массы — речная и морская. За небольшой интервал вре-

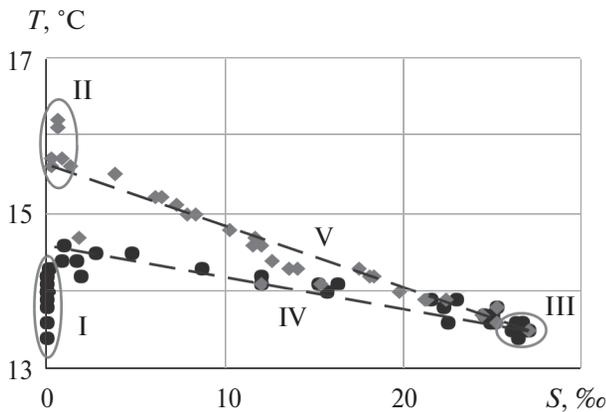


Рис. 4. T - S -диаграмма водных масс (ВМ) в эстуарии р. Большой (22.07.2005): I — речная ВМ; II — речные и смешанные воды, прогретые в оз. Большом; III — морская ВМ (устье эстуария); IV — прямая смешения ВМ в водотоке; V — прямая смешения водных масс в оз. Большом. Ромбики — измерения в оз. Большом, кружочки — в эстуарном водотоке.

мени, когда первичные водные массы находятся внутри эстуария, они успевают лишь немного нагреться и частично перемешаться. Это закономерно, поскольку интенсивное водообновление и отсутствие замкнутых котловин в эстуарии препятствуют формированию вторичных водных масс.

Наблюдения показали, что в период низких малых вод весь эстуарий занят речной водой, а зона смешения водных масс находится на устьевом взморье. В приливную фазу, обычно через 3–4 ч после низких малых вод в море, морская водная масса проникает в эстуарий. По эстуарному водотоку она перемещается у дна в виде

“клина”, средняя скорость движения которого составляет 2–2.5 км/ч (в квадратуры медленнее, а в сизигии быстрее). В течение большей части года морская вода достигает оз. Большого, в котором она активно смешивается с речной водой под действием ветрового волнения. Кроме этого, водные массы смешиваются на фронте движения клина в эстуарном водотоке. После наступления высоких полных вод движение клина прекращается, спустя еще некоторое время начинается отток морской и смешанной воды (для удобства объединим их термином “осолоненные воды”) из эстуария. В отливную фазу в верхнем слое эстуарного водотока в море стекает речная вода, а в нижнем слое в том же направлении текут осолоненные воды. Благодаря смешению объем осолоненных вод больше объема проникшей в эстуарий морской воды, поэтому их отток продолжается дольше, чем приток морской воды в приливную фазу. В результате в теплый период года в нижней части эстуарного водотока (от входа в оз. Большое до устья эстуария) осолоненная вода находится в придонном горизонте до 20 ч в сутки.

Помимо суточных перемещений, ЗС мигрирует с сезонной и полумесячной периодичностью. На пике половодья мощный речной поток вытесняет эту зону на устьевое взморье. А при $Q = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ и сизигийных приливах ЗС охватывает почти половину эстуарного водотока и ближайшую к нему часть оз. Большого (рис. 1; рис. 5). На рис. 5 в графическом виде представлена зависимость дальности проникновения клина осолоненных вод от величин речного стока и приливов в море. В целом она имеет тот же характер, что и на рис. 3, но есть и своя особенность: по

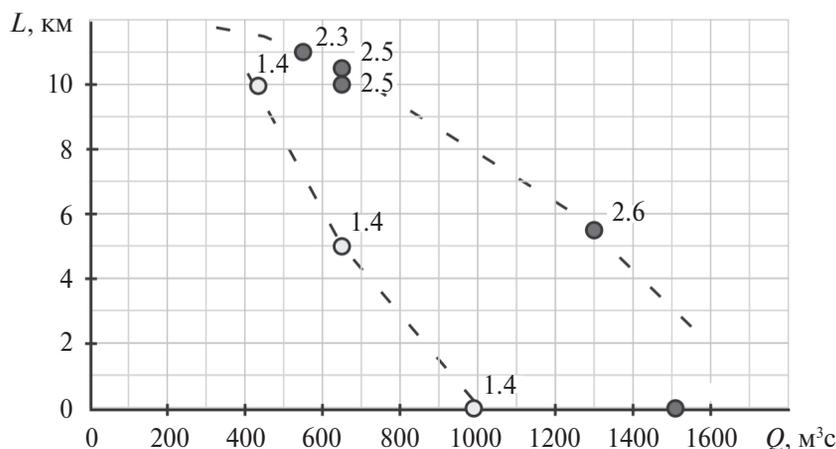


Рис. 5. Дальность проникновения осолоненной воды L в эстуарии р. Большой в зависимости от величин притока речной воды и приливов в Охотском море. Подписи рядом с точками соответствуют величинам больших приливов в море, Q — суммарный речной расход. Вершина клина осолоненных вод определяется по изогалине 1‰ в придонном горизонте.

мере уменьшения речного стока влияние квадратурных приливов приближается к влиянию сизигийных. Так, при $Q = 650 \text{ м}^3/\text{с}$ осолоненные воды проникают в эстуарий на 5 км в квадратурные и на 10 км в сизигийные приливы, а при $Q \sim 500 \text{ м}^3/\text{с}$ — уже на 10 и 11 км соответственно. При сопоставлении рис. 3 и 5 может возникнуть впечатление, что между ними есть противоречие, ведь получается, что при $Q \sim 500 \text{ м}^3/\text{с}$ дальность проникновения осолоненных вод в квадратуры и сизигии одинакова, а объемы притока морской воды в те же периоды различаются между собой в 2.5 раза. Но в сизигийные приливы морская вода занимает всю толщу приморской части водотока, а в квадратурные приливы она распространяется лишь по его дну. Поэтому при одинаковой длине участка осолонения объемы притока морской воды различны.

Большой практический интерес представляет оценка эмпирических параметров a и b в формуле для определения дальности проникновения осолоненных вод: $L_s = ahFr_p^{-b}$ (Fr_p — плотностное число Фруда, h — средняя глубина в русле эстуария) [13]. Для эстуария р. Большой $b = 2.93$, что согласуется с величинами, полученными для многих других устьев рек [13], а величина $a = 0.55$.

По наблюдениям авторов статьи, наибольшая дальность распространения осолоненных вод в эстуарном водотоке в теплый период года составляет ~ 11 км. Но, учитывая сообщения местных жителей, можно предположить, что при сочетании низкого речного стока, сизигийных приливов и морских нагонов дальность проникновения осолоненных вод может достигать 12–13 км.

Сезонные изменения речного стока очень слабо влияют на среднюю скорость движения клина осолоненных вод по эстуарному водотоку (2–2.5 км/ч). Но даты начала движения клина от устья эстуария в разные сезоны неодинаковы: чем больше речной сток, тем позже (по отношению к низким малым водам в море) оно наступает. Из этого следует, что в эстуарии р. Большой главный регулятор дальности проникновения осолоненных вод — устьевой бар: чем больше речной сток, тем больше напор стоково-отливного потока на баровых мелководьях и тем большее сопротивление оказывается приливной интрузии осолоненных вод.

Граница между речной и морской водными массами в эстуарном водотоке почти горизонтальна — уклон изогалин здесь не превышает

1–3 м/км. (Температура речной и морской воды различается не более чем на 3°C , поэтому градиенты плотности в ЗС возникают в основном из-за разной солености воды.) При этом существует закономерность, в соответствии с которой уклон изогалин в ЗС становится больше при уменьшении речного стока или при увеличении приливов. Вертикальные градиенты солености максимальны в средней части ЗС — $\sim 25\text{‰}$ на 2 м. Протяженность ЗС (горизонтальное расстояние между изогалинами 1 и 25‰) в эстуарном водотоке составляет 1–2 км. В мелководном оз. Большом в процессе ветрового перемешивания ЗС размывается, и поэтому ее протяженность достигает 5–6 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эстуарий р. Большой, так же как и многие другие объекты в устьях рек Западной Камчатки, относится к лагунно-русловому подтипу. Он сформировался в условиях довольно значительного речного стока ($Q_{\text{cp}} \sim 320 \text{ м}^3/\text{с}$) и средних морских приливов (B — от 1.1 до 2.6 м) на выровненном морском побережье, открытом для сильного волнения. Эстуарий представляет собой систему водных объектов, протянувшуюся вдоль морского берега на 34 км. От моря он отделяется песчано-галечной косой-пересыпью. Системообразующий элемент в эстуарии — водоток, соединяющий главную реку с морем. К вершине водотока и к его средней части примыкают два небольших мелководных водоема (Микояновский лиман и оз. Большое).

Под совместным воздействием стока речной воды и морских приливов в эстуарии сформировался специфический гидрологический режим. Уровень воды в нем изменяется с суточной, полумесячной и сезонной периодичностью. При этом чем больше речной сток и/или дальше место наблюдений от моря, тем слабее выражены первые два вида изменчивости и заметнее последний из них. В половодье уровень воды в эстуарии на 1–2 м выше, чем в межень; в сизигию — на 0.2 м выше, чем в квадратуру. Приливные колебания уровня в эстуарном водотоке достигают 2.0, а в водоемах — 0.4–0.5 м.

В эстуарии нет замкнутых котловин и велика проточность (в теплый период года вода в нем обновляется не более чем за 1–2 сут), поэтому в нем не формируются вторичных водных масс и между собой взаимодействуют только первичные (речные и морские) водные массы. При этом речные факторы оказывают на эстуарий большее

влияние, чем морские, поэтому основная часть эстуария заполнена пресной водой. Осолоненные воды проникают в него только в приливную фазу, преимущественно в виде клина. Положение ЗС в эстуарии зависит от сочетания речных и морских факторов и поэтому изменяется с суточной, полумесячной и сезонной периодичностью. На пике особо высоких половодий ЗС может вытесняться в море (при $Q > 1500 \text{ м}^3/\text{с}$). В летнюю межень ЗС в отлив находится за пределами эстуария, а в прилив перемещается в его приморскую часть. Предельное положение речной границы ЗС в эстуарии р. Большой составляет 11–12 км от его устья и достигается при сочетании низкого речного стока и сизигийных приливов.

Благодаря притоку и последующему оттоку морской воды средний приливный расход воды в устье эстуария в 1.5 раза, а максимальный в 2.5 раза больше стокового. С увеличением расстояния от моря величины среднего приливного и максимального суточного расхода воды закономерно уменьшаются. Такие особенности водообмена между эстуарием и морем отражаются на рельефе: отметки дна эстуарного водотока понижаются от его вершины к устью на ~1.5 м.

Авторы благодарны В.Н. Леману (ВНИРО) за многолетнюю поддержку исследований, В.Н. Михайлову (МГУ им. М.В. Ломоносова) за ценные консультации, В.В. Ковбасюку (Камчатское УГМС) за предоставленные данные сетевых гидрометеорологических наблюдений, С.В. Шмигалеву (КамчатНИРО) за помощь в экспедициях, а также Д.В. Мишину (ГОИН) за расчет кривых свободной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек. Методические указания. М.: Гидрометеиздат, 1993. 183 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 342 с.
3. Горин С.Л. Изменение гидрологических условий в эстуарии реки Большой в процессе его развития // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Материалы VII междунар. научн. конф. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 66–69.
4. Горин С.Л. История отображения эстуария реки Большой (Западная Камчатка) на картах // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Материалы IX междунар. научн. конф. Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 60–64.
5. Горин С.Л. Гидролого-морфологические исследования эстуария р. Большой и Октябрьской косы в XVIII–XX вв. // Материалы междунар. исторических XXVI Крашенинниковских чтений. Петропавловск-Камчатский, 2009. С. 73–76.
6. Горин С.Л. Эстуарии полуострова Камчатка: теоретические подходы к изучению и гидролого-морфологическая типизация. Итоги 10 лет исследований // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-Западной части Тихого океана. 2012. Вып. 27. С. 5–12.
7. Горин С.Л. Современные морфологическое строение и гидрологический режим эстуария реки Камчатки // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-Западной части Тихого океана. 2013. Вып. 31. С. 6–26.
8. Горин С.Л. Морфодинамика устья реки Камчатка в XVIII–XX вв. и ее влияние на гидрологический режим устьевых водоемов // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-Западной части Тихого океана. 2014. Вып. 32. С. 79–88.
9. Горин С.Л., Игнатов Е.И., Кравчуновская Е.А., Корзинин Д.В., Тембрел И.И. Морфодинамика Октябрьской косы (Охотоморское побережье Камчатки) // Морские берега – эволюция, экология, экономика. Материалы XXIV междунар. береговой конф. Краснодар, 2012. Т. 1. С. 94–97.
10. Горин С.Л., Коваль М.В. Состояние и перспективы исследований в эстуариях Камчатского края // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. Тр. Четвертой Всерос. научн. конф. с международ. участием. 2015. С. 402–405.
11. Кравчуновская Е.А., Тембрел И.И., Горин С.Л. Штормовые переливы на Октябрьской косе и их воздействие на автодорогу Усть-Большерецк – Октябрьский // Морские берега – эволюция, экология, экономика. Материалы XXIV Международ. береговой конф. Краснодар, 2012. Т. 1. С. 211–214.
12. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
13. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 175 с.
14. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.
15. Разработка рекомендаций по защите косы от разрушения волнами у Октябрьского рыбокомбината (архив Камчатского УГМС). Владивосток: Дальморнии-проект, 1982. 95 с.
16. Функционирование субарктической гидротермальной экосистемы в зимний период / Под ред. Болотова И.Н. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 252 с.
17. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергия, 1975. 600 с.

**HYDROLOGICAL PROCESSES IN A LAGOON-CHANNEL
ESTUARY DURING THE WARM PERIOD OF THE YEAR:
A STUDY OF THE BOLSHAYA RIVER MOUTH, WEST KAMCHATKA**

S. L. Gorin^{1,*}, A. A. Popryadukhin², M. V. Koval³

*¹Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography,
Moscow, 107140 Russia
E-mail: gorinser@mail.ru

*²Faculty of Geography, Moscow State University,
Moscow, 119991 Russia*

*³Kamchatka Research Institute of Fisheries and Oceanography,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683000 Russia*

Received: 06.09.2017.

Received version received: 12.12.2017.

Accepted: 26.12.2017.

Based on long-term field studies, we investigated the hydrological regime of the lagoon-channel estuary of the Bolshaya river. This river is located in the Kamchatka Krai, which is one of the most remote and underdeveloped regions of Russia. Numerous observations were made of the estuary and its processes, and the natural environment in which it exists.

Key words: Estuarial area, estuary, hydrology, water masses, water mixing, Kamchatka.

DOI: 10.31857/S0321-05964612-13