

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 551.468.6

РАЗГРУЗКА ГРУНТОВЫХ ОСОЛОНЕННЫХ ВОД В ЭСТУАРИИ РЕКИ РАЗДОЛЬНОЙ (АМУРСКИЙ ЗАЛИВ) В ФЕВРАЛЕ 2020 г.¹

© 2021 г. П. Ю. Семкин^{a, *}, П. Я. Тищенко^a, А. Н. Чаркин^a,
Г. Ю. Павлова^a, П. П. Тищенко^a, Е. В. Анисимова^a, Ю. А. Барабанщиков^a,
А. Э. Леусов^a, Т. А. Михайлик^{a, b}, Е. Ю. Тибенко^a, Т. Л. Чижова^a

^aТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, 690041 Россия

^bСанкт-Петербургский филиал ВНИРО (“ГосНИОРХ” им. Л.С. Берга),
Санкт-Петербург, 199053 Россия

*e-mail: pahno@list.ru

Поступила в редакцию 04.04.2020 г.

После доработки 22.06.2020 г.

Принята к публикации 16.10.2020 г.

В феврале 2020 г. на основе геохимических трассеров, гидрохимических и гидрологических характеристик обнаружена разгрузка грунтовых осолоненных вод в вершине эстуария р. Раздольной на расстоянии 22 км от устьевого бара. Повышенная активность изотопов ^{224}Ra от 11.1 ± 0.1 до 2.2 ± 0.05 Бк/м³ в придонном слое воды на протяжении 15 км указывает на распространение осолоненных вод из плеса глубиной 8 м в направлении приемного бассейна. Распределение стабильных изотопов воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) и ионов основного солевого состава показало, что воды верхнего водоносного горизонта в створе района разгрузки могут быть подвержены влиянию морских вод. В качестве основной причины наблюдаемого явления рассматривается проникновение морских вод в верхний водоносный горизонт в пределах эстуария в период зимней межени и просачивание этих вод в районе с наибольшей глубиной. Контраст температуры грунтовых и поверхностных вод сопровождался положительной температурной аномалией в районе их взаимодействия и снижением толщины льда вдоль зоны смешения.

Ключевые слова: эстуарий, разгрузка грунтовых вод, водоносный горизонт, изотопы: ^{224}Ra , $\delta^{18}\text{O}$ и δD , период ледостава.

DOI: 10.31857/S0321059621030123

ВВЕДЕНИЕ

Разгрузка субмаринных грунтовых вод (СГВ) — это повсеместное явление в прибрежно-морских акваториях, которое оказывает значимое влияние на гидрологические, гидрохимические и гидробиологические режимы приемных бассейнов [19]. При этом потоки грунтовых вод в прибрежные акватории демонстрируют значительную пространственную и временную неоднородность и могут быть результатом разгрузки из нескольких водоносных горизонтов. Поэтому отслеживание и измерение величины потока СГВ и связанных с ним потоков веществ — сложная задача. Измерение солёности — это самый простой способ зафиксировать СГВ в прибрежных акваториях. Од-

нако, как правило, этот способ неинформативен, поскольку СГВ могут быть представлены смесью грунтовых вод суши и морской воды, рециркулируемой в водоносных горизонтах. Показано, что изотопы радия (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{223}Ra и ^{224}Ra) с периодом полураспада 1602 года, 5.75 года, 11.4 дня и 3.66 дня соответственно — мощный инструмент для отслеживания источников и количественной оценки потоков СГВ в прибрежные бассейны [13]. Существенное различие стабильных изотопов воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) в метеорных, речных, морских и грунтовых водах позволяет успешно использовать их в качестве прямого метода для изучения генезиса вод в гидрогеологии и гидрологии поверхностных вод [8]. Необходимо отметить, что российскими специалистами исследование разгрузки СГВ в прибрежно-морских акваториях с использованием естественных радионуклидов ограничены только публикацией по району арктического шельфа [15].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Президента Российской Федерации (проект МК-153.2020.5), РФФ (проект 19-17-00058), в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН (регистрация № АААА-А17-117030110038-5, АААА-А17-117030110042-2).

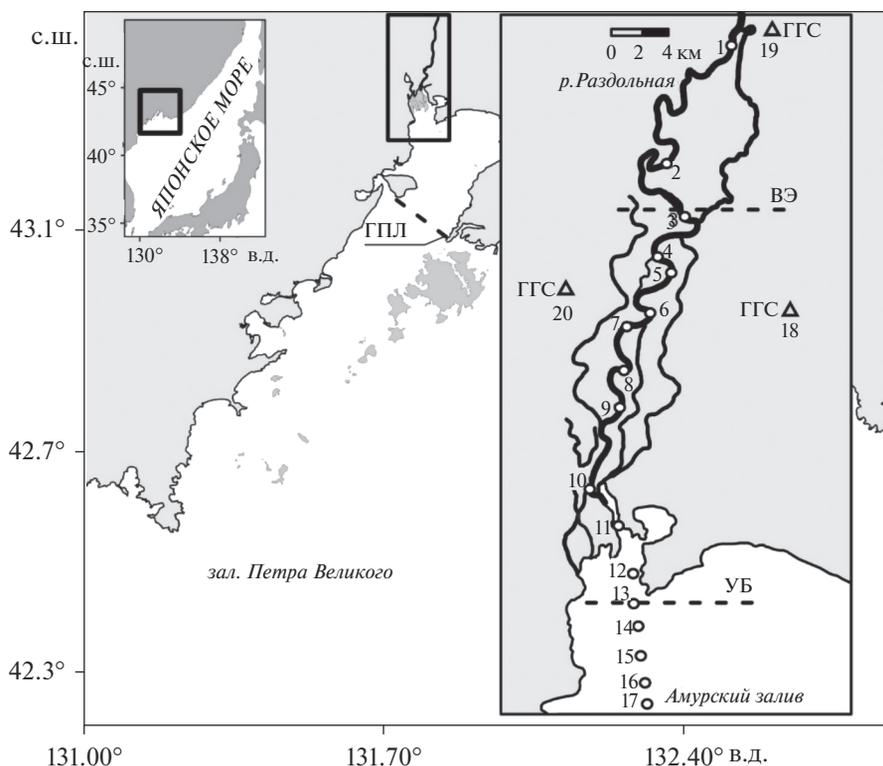


Рис. 1. Картограмма территории расположения гидролого-гидрохимических (1–17) и гидрогеологических (ГГС – 18–20) станций. ГПЛ – граница припайного льда, ВЭ – вершина эстуария, УБ – устьевой бар.

Цель работы – дать общую характеристику разгрузки и генезиса СГВ в эстуарии р. Раздольной, используя данные радиоактивных изотопов ^{224}Ra , стабильных изотопов воды, макрокомпонентного состава воды, а также гидрологические параметры.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эстуарий трансграничной р. Раздольной (Китай – Приморский край РФ), согласно имеющимся публикациям, обобщенным в работе [2], и уточненной устьевой терминологии [3], простирается более чем на 45 км от вершины в долине реки до нижней границы в Амурском заливе Японского моря (рис. 1).

Из первых исследований [1] следует, что эстуарий относится к микроприливному типу с сильной стратификацией вод (величина сизигийных приливов от 15 до 20 см). Гидрологический режим эстуария р. Раздольной во многом определяется объемом речного стока [2]. Средний расход реки за многолетний период на посту в с. Тереховка – $70.6 \text{ м}^3/\text{с}$ [5]. В водном режиме р. Раздольной выделяется устойчивая зимняя межень со среднемесячным расходом реки в январе и феврале $2\text{--}3 \text{ м}^3/\text{с}$ и абсолютным наименьшим расходом в феврале $0.3 \text{ м}^3/\text{с}$ [5]. Весеннее половодье наблюдается в

мае. Максимумы весенних половодий в ~ 10 раз превосходят средний годовой расход реки. Абсолютные максимумы расхода в период паводков летом и осенью в отдельные годы превышают $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ [5]. В период ледостава с конца ноября по начало апреля в эстуарии р. Раздольной устанавливается типичный для япономорских эстуариев на побережье России режим максимального проникновения клина осолоненных вод на расстояние до 28 км от устьевых баров реки [2]. При этом соленность воды в Амурском заливе составляет $\sim 34\text{‰}$, а выше лимана $\leq 26\text{‰}$ [2].

С 10 по 13 февраля 2020 г. были отобраны пробы с придонного и поверхностного слоев воды на 17 гидрохимических станциях, расположенных от нижнего течения реки до северной части Амурского залива (рис. 1). Также на трех гидрогеологических станциях (ГГС) на границе поймы р. Раздольной были отобраны пробы воды с верхнего водоносного горизонта, который расположен на расстоянии 6–7 м от поверхности грунта. В пробах воды определяли активность растворенного короткоживущего изотопа ^{224}Ra и его родительского изотопа ^{228}Th с использованием системы задержанных совпадений RaDeCC (Radium Delayed Coincidence Counter) [18]. Для этого отобранные пробы воды объемом 22 л фильтровали со скоростью 0.3 л/мин через акриловую вату, по-

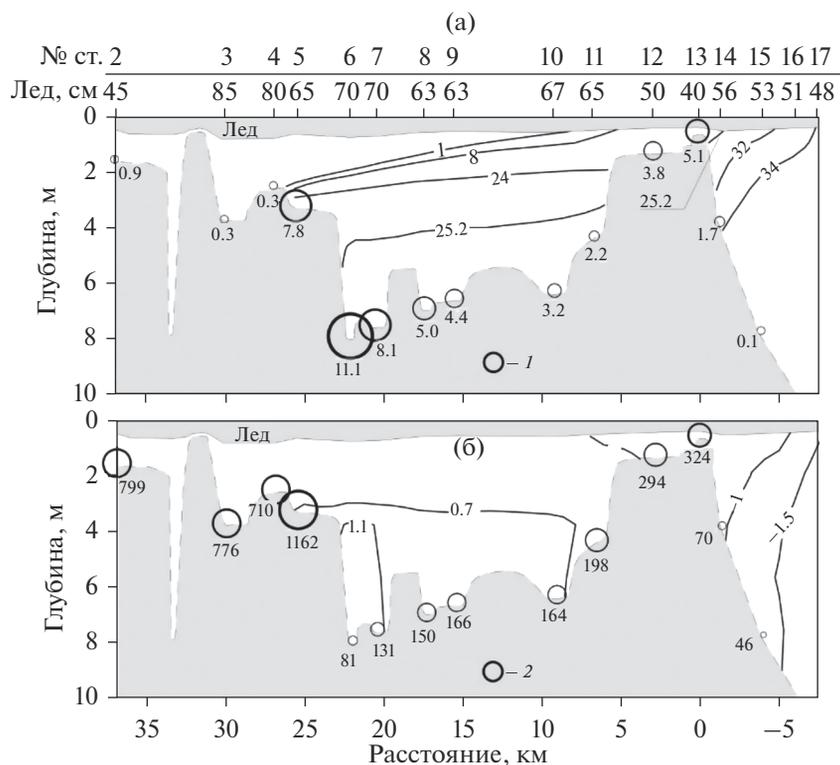


Рис. 2. Соленость, ‰, в продольном профиле эстуария р. Раздольной (изолинии); активность изб. ^{224}Ra ($\text{Бк}/\text{м}^3$) в придонном слое воды – 1 (а); температура, $^{\circ}\text{C}$ – изолинии; мутность (ftu) в придонном слое воды – 2 (б). Расстояние отсчитывается от устьевых бара реки вдоль русла, слева – река, справа – море.

крытую MnO_2 . Образцы ваты с радием были измерены в первые 2 сут после отбора, затем повторно через 3–4 недели после перехода избыточного ^{224}Ra (изб. ^{224}Ra) в равновесие с родительским изотопом ^{228}Th (период полураспада 1.9 года). Далее проводили повторные измерения для получения активности изотопов ^{228}Th , после чего рассчитывали активность изб. ^{224}Ra , повышение которой и может указывать на присутствие грунтовых вод в поверхностных водах. Стабильные изотопы воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) исследовали на лазерном анализаторе “Picargo L2130-I” (“Picargo Inc.”, США) с использованием стандарта VSMOW-2. Концентрации макро-ионов (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) измерены на хроматографе “LC-20A” (“Shimadzu”, Япония). В качестве концентрации гидрокарбонатного иона HCO_3^- принималась величина щелочности. Соленость определяли на солемере “Guildline Autosal 8400B” (“Guildline Instruments”, США). Для получения профилей температуры, солености и мутности на каждой станции использовали профилограф “SBE 19plus” (“Sea-bird Electronics”, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Активность изб. ^{224}Ra , соленость, мутность и температура вдоль профиля наибольших глубин в эстуарии р. Раздольной представлены на рис. 2. Наибольшая активность изб. ^{224}Ra , равная $11.1 \pm 0.1 \text{ Бк}/\text{м}^3$, зафиксирована в придонных водах над депрессией рельефа эстуария на ст. 6 (рис. 1) на удалении 22 км от устьевых бара реки (рис. 2а).

По мере движения в направлении моря вплоть до мелководного лимана активность изб. ^{224}Ra снижалась практически линейно, а соленость в придонном слое воды была $\sim 25.2\text{‰}$. Также отмечено два района с повышенной активностью изб. ^{224}Ra в придонном слое – на верхней и нижней границах зоны смешения речных и морских вод, а именно – $7.8 \pm 0.02 \text{ Бк}/\text{м}^3$ при солености 3.8‰ на ст. 5 в вершине эстуария и $5.1 \pm 0.07 \text{ Бк}/\text{м}^3$ при солености 16.6‰ на ст. 13 в районе устьевых бара реки. Минимальная активность изб. ^{224}Ra составляла $<1 \text{ Бк}/\text{м}^3$ и наблюдалась для речных и морских вод за пределами зоны смешения. При этом мутность в плесе на ст. 6 была минимальной – на уровне величины мутности, которая наблюдалась в морской воде за пределами зоны смешения, тогда как в водах с повышенной

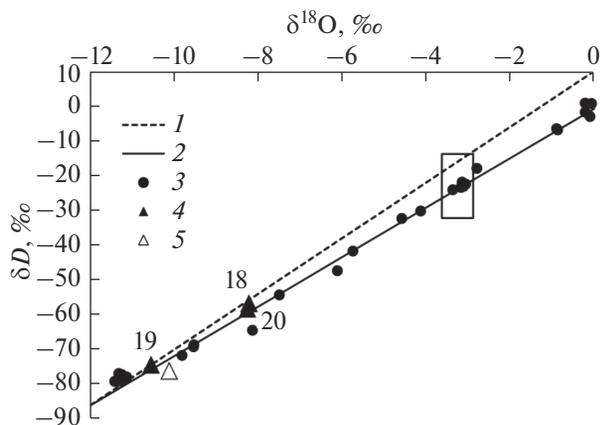


Рис. 3. Распределение изотопного состава воды $\delta^{18}\text{O}$ и δD относительно глобальной линии метеорных вод 1 [14] и локальной линии 2 [7]; 3 – воды эстуария р. Раздольной; 4 – грунтовые воды на ст. 18, 19, 20; 5 – пресные грунтовые воды в скважине на глубине 15 м по [10]. Выделенная область на графике соответствует водам в районе разгрузки СГВ (ст. 6, 7).

активностью изб. ^{224}Ra на ст. 5 и 13 обнаружены максимальные величины мутности (рис. 2б).

В районе с максимальной активностью изб. ^{224}Ra на ст. 6, несмотря на льдообразование, наблюдалась температурная аномалия придонного слоя воды ($>1.1^\circ\text{C}$). Повышенная температура на протяжении всей зоны смешения сопровождалась равномерным снижением толщины льда: с 85 см непосредственно перед зоной смешения до 40 см в районе устьевого бара реки, в то время как с морской стороны от устьевого бара температура воды была отрицательной (рис. 2б), а толщина льда достигала 56 см. Температура воды на ГГС составляла от $+3.91$ до $+4.29^\circ\text{C}$, а в реке на ст. 1 $+0.09^\circ\text{C}$. Отмеченные закономерности указывают на то, что повышенная активность изб. ^{224}Ra , приуроченная к мелководьям на границах зоны смешения (ст. 5, 13), вероятнее всего, связана с поступлением изотопов радия из глинистых частиц взвеси, содержащих изотопы тория и являющихся постоянными источниками короткоживущих дочерних изотопов радия. Такие аномалии характерны для речных плюмов с высокой концентрацией осадочного материала. Для сравнения можно отметить зону наибольшей мутности с повышенной активностью – 4 Бк/м^3 в поверхностных водах эстуария р. Анадырь [9]. Максимальные величины активности изб. ^{224}Ra и температуры при минимальной мутности в плесе на ст. 6 указывают на наличие разгрузки относительно теплых СГВ в данном районе. Соленость этих вод при смешении с поверхностными водами составляла $\sim 25.2\text{‰}$ (рис. 2а). Существование повышенного фона активности радия в придонном слое воды при неизменной солености на протяжении

15 км от источника СГВ (ст. 6 – $11.1 \pm 0.1 \text{ Бк/м}^3$) до мелководного лимана (ст. 11 – $2.2 \pm 0.05 \text{ Бк/м}^3$) указывает на распространение этих вод в направлении к морю от района их разгрузки (рис. 2а, 2б).

Из рис. 3 видно, что изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) вод в придонном слое эстуария в районе разгрузки СГВ близок к изотопному составу вод Амурского залива, который, в свою очередь, находится на уровне стандарта морской воды.

Понижение концентрации тяжелых изотопов в СГВ связано с влиянием на них пресных речных/грунтовых вод – облегченных по отношению к морским водам. Известно, что смешение морских и пресных грунтовых вод в прибрежных водоносных горизонтах сопровождается комбинацией состава стабильных изотопов воды в зависимости от объема тех и других [8]. В грунтовых водах на траверзе разгрузки СГВ (ГГС 18, 20) значения изотопного состава $\delta^{18}\text{O}$ и δD на графике находились между значениями для вод Амурского залива и грунтовых вод, отобранных из наиболее удаленной от моря ГГС 19 (рис. 3). Результаты настоящих исследований для ГГС 19 хорошо согласуются с полученными ранее результатами по изотопному составу пресных грунтовых вод верхнего водоносного слоя по результатам гидрогеологического бурения [10] (рис. 3). При этом пресные грунтовые воды незначительно утяжеляются по сравнению с речными водами (рис. 3). На основе изотопного состава, начиная от самого тяжелого, можно разделить воды исследуемого района на пять типов: 1) морские воды; 2) воды в районе разгрузки СГВ, изотопный состав которых определяется долей морских и пресных вод; 3) грунтовые воды, имеющие утяжеленный изотопный состав по сравнению с речными водами (ГГС 18, 20); 4) грунтовые воды, не испытывающие влияние со стороны моря (ГГС 19); 5) речные воды.

Макрокомпонентный состав поверхностных, грунтовых вод суши и морских вод всегда имеет существенные отличия. В морских водах доминируют ионы натрия и хлорид-ионы, в речных водах гумидного климата доминируют, как правило, ионы кальция и гидрокарбонат-ионы. Повышение концентрации ионов натрия и хлорид-ионов наблюдалось в грунтовых водах на ГГС 18, 20 (табл. 1). Высокие концентрации ионов Ca^{2+} на ГГС 20 могут быть результатом влияния химического выветривания водовмещающих пород, содержащих кальций.

Таким образом, в верхнем водоносном горизонте на траверзе разгрузки СГВ в эстуарии р. Раздольной наблюдалось утяжеление изотопного состава воды и повышение концентрации хлорид-ионов и ионов натрия. Можно предположить, что такое сочетание характеристик свидетельствует о том, что в период съемки морская во-

Таблица 1. Соленость S , ‰; концентрация макрокомпонентов и общая щелочность ТА (ммоль/кг) в пробах воды, отобранных на ГГС и в р. Раздольной

№ станции	S	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	ТА
ГГС 18	0.15	0.84	0.41	1.26	0.11	0.43	0.25	0.86
ГСС 19	0.10	0.11	0.01	0.38	0.10	0.57	0.24	1.94
ГГС 20	0.35	2.47	0.13	1.39	0.10	2.09	0.62	4.17
р. Раздольная (ст. 1)	0.14	0.37	0.23	0.66	0.07	0.63	0.33	1.63

да заполняла верхний водоносный горизонт, в результате чего в пределах эстуария р. Раздольной формировалась смесь осолоненных и пресных грунтовых вод. В исследуемом случае ГГС 18, 20 располагались на границах проникновения морских вод в верхний водоносный горизонт, что объясняет отсутствие роста солености в пробах, отобранных с верхнего водоносного горизонта (табл. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ

Разгрузка пресных СГВ – распространенное явление для шельфа [13]. В работе [15] обсуждалась разгрузка осолоненных вод, имеющих подмерзлотный генезис, которые поступают на шельф моря Лаптевых через существующие в мерзлоте талики. Авторы статьи полагают, что основной источник СГВ в вершине эстуария р. Раздольной – морские воды, проникающие в прибрежный водоносный горизонт. Проникновение морских вод в прибрежные водоносные горизонты в той или иной степени обычно происходит повсеместно [11]. Это многофакторный процесс, который в основном определяется балансом гидравлического напора морских и метеорных вод и коэффициентом проницаемости водоносных горизонтов [19]. По данным гидрогеологического бурения [10], верхний водоносный горизонт поймы р. Раздольной – это слой верхнечетвертичных современных аллювиальных отложений. Этот слой имеет высокий коэффициент проницаемости, поскольку его водовмещающие породы представлены валунниками, галечниками, песками. Второй возможный источник грунтовых вод в придонном слое эстуария – глубинные водоносные горизонты в районе эстуария р. Раздольной. Но эти воды обладают более легким составом $\delta^{18}O$ и δD , чем воды верхнего водоносного горизонта и поверхностные воды р. Раздольной [10], поэтому их влияние в данном случае полностью исключается.

В зимний сезон создаются благоприятные условия для проникновения морских вод в верхний водоносный горизонт и для последующей их разгрузки в вершине эстуария. Это следует из особенности р. Раздольной – ярко выраженной сезонной изменчивости расхода: в феврале сред-

ний многолетний расход уменьшается в ~35 раз по сравнению со среднегодовым расходом и в сотни раз – по сравнению с максимальным расходом в период открытого русла. При этом следует ожидать существенную сезонную изменчивость гидравлического напора воды в верхнем водоносном горизонте со стороны суши и наибольшее влияние моря в период межени. Сезонный приток и отток морской воды в прибрежном водоносном горизонте в результате сезонной изменчивости загрузки верхнего водоносного горизонта – это концепция, предложенная относительно недавно в работе [17]. Для объяснения источника соленых грунтовых вод в [17] рассматривается связь сезонной изменчивости положения фронта между грунтовыми пресными и грунтовыми морскими водами с годовым циклом загрузки метеорных вод в водоносном горизонте. Созданная авторами [17] численная модель показала, что движение фронта между пресными и морскими водами в водоносном горизонте будет проходить с задержкой до 3 мес. по сравнению с водным режимом поверхностных вод. Недавние полевые исследования подтвердили, что проникновение морских вод в прибрежные водоносные горизонты часто имеет сезонную периодичность, связанную с сезонным циклом пополнения этих водоносных горизонтов метеорными водами [12]. Данные настоящего исследования по стабильным изотопам воды свидетельствуют о том, что зимой в пределах эстуария р. Раздольной верхний водоносный горизонт испытывает влияние морских вод. Это происходит из-за гидравлического напора со стороны моря, что можно сравнить с ситуацией, наблюдаемой в верхнем водоносном горизонте в период сезонной засухи, например в восточной Африке [16].

Для верхнего водоносного горизонта в пределах эстуария р. Раздольной на проникновение морских вод будут накладываться колебания гидравлического напора со стороны моря, связанные с приливами. Такие колебания были наглядно продемонстрированы в ходе экспериментов по исследованию влияния приливов на проникновение морских вод в прибрежные водоносные горизонты [20]. Для эстуария р. Раздольной колебания гидравлического напора в верхнем водоносном горизонте под действием приливов должны со-

проводятся периодическим повышением температуры и солености воды в районе разгрузки СГВ. Такая изменчивость, точно совпадающая с периодом приливов в Амурском заливе, была отмечена ранее в вершине эстуария на расстоянии >20 км от устьевого бара реки [6].

Разгрузку СГВ совместно с проникновением морских вод в прибрежный водоносный горизонт в эстуарии р. Раздольной можно в определенной степени сравнить с плотностной эстуарной циркуляцией [3]. Но в данном случае циркуляция происходит с участием потока грунтовой морской воды в вершину эстуария, который формирует разгрузку СГВ. Просачивание относительно теплых грунтовых вод через осадок происходит в наиболее глубоководном створе эстуария (рис. 2); т.е. в данном случае ключевой фактор для разгрузки СГВ – понижение линии дна по отношению к уровню моря, которое в районе с наибольшей активностью изб.²²⁴Ra составило ~8 м на расстоянии 22 км от устьевого бара реки. В результате разгрузки СГВ и распространения их в направлении моря вся депрессия рельефа на протяжении >15 км между районом разгрузки СГВ и мелководным лиманом в феврале заполняется относительно теплыми осолоненными водами, которые имеют повышенную активность изб.²²⁴Ra по отношению к водам за пределами зоны смешения (рис. 2).

ВЫВОДЫ

В феврале 2020 г. в эстуарии р. Раздольной была обнаружена разгрузка осолоненных грунтовых вод. Этот результат подтвержден данными радиоактивных изотопов и гидрологическими характеристиками.

Разгрузка грунтовых вод приурочена к наиболее глубоководному створу в районе вершины эстуария и объясняется проникновением морских вод в прибрежный водоносный горизонт в период зимней межени.

Разгрузка грунтовых вод сопровождается увеличением солености воды, понижением концентрации взвеси, формированием положительной температурной аномалии, что вызывает уменьшение толщины льда в районе взаимодействия грунтовых и поверхностных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомоюнов К.А. Гидрологический очерк Амурского залива и реки Суйфуна // Производительные силы Дальнего Востока. Тр. 1-й конф. Владивосток, 1927. Вып. 2. С. 73–91.
2. Звалинский В.И., Марьяш А.А., Тищенко П.Я и др. Продукционные характеристики эстуария реки Раздольной в период ледостава // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С.155–174.
3. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с.
4. 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.
5. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 1. Вып. 21. 387 с.
6. Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В. Б. и др. Обмен вод в эстуарии реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // Изв. ТИНРО. 2019. Т. 196. С. 123–137.
7. Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Павлова Г.Ю. и др. Гидрохимия эстуария реки Туманной (Японское море) // Океанология. 2018. Т. 58. № 2. С. 192–204.
8. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Науч. мир, 2009. 632 с.
9. Чаркин А.Н., Дударев О.В., Салюк А.Н. и др. Короткоживущие изотопы ²²⁴Ra и ²²³Ra в системе река Анадырь—Берингово море // ДАН. 2017. Т. 476. № 1. С. 51–54.
10. Челноков Г.А., Харитонова Н.А., Зыкин Н.Н., Верещагина О.Ф. Генезис подземных минеральных вод Раздольненского проявления (Приморский край) // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 6. С. 65–72.
11. Bear J.A., Cheng H.D., Sorek S., Ouuzar D., Herrera I. Seawater intrusion in coastal aquifers – concepts, methods and practices. Amsterdam: Springer, 1999. 625 p.
12. Baena-Ruiz L., Pulido-Velazquez D., Collados-Lara. et al. Global assessment of seawater intrusion problems (status and vulnerability) // Water Res. Management. 2018. V. 32. № 8. P. 2681–2700.
13. Burnett W.C., Aggarwal P.K., Aureli A. et al. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods // Sci. Total Environ. 2006. V. 367. № 2–3. P. 498–543.
14. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Sci. 1961. V. 133. № 3465. P. 1702–1703.
15. Charkin A.N., Van Der Loeff M.R., Shakhova N.E. et al. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: A case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea // The Cryosphere. 2017. V. 11. № 5. P. 2305–2327.
16. Ferrer N., Folch A., Lane M. et al. Groundwater hydrodynamics of an Eastern Africa coastal aquifer, including La Niña 2016–17 drought // Sci. Total Environ. 2019. V. 661. P. 575–597.
17. Michael H.A., Mulligan A.E., Harvey C.F. Seasonal oscillations in water exchange between aquifers and the coastal ocean // Nature. 2005. V. 436. P. 1145–1148.
18. Moore W.S., Arnold R. Measurement of ²²³Ra and ²²⁴Ra in Coastal Waters Using Delayed Coincidence Counter // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 1321–1329.
19. Moore W.S. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean // Ann. Rev. Mar. Sci. 2010. V. 2. P. 59–88.
20. Shen Y., Xin P., Yu X. Combined effect of cutoff wall and tides on groundwater flow and salinity distribution in coastal unconfined aquifer // J. Hydrol. 2020. V. 581. [Электронный ресурс]. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124444>