

- [14] Oblogov G. E., Streleckaya I. D., Vasilyev A. A., Arslanov H. A. Cetvertichnie otlozheniya i geokriologiceskie uslyviya beregov Ghidanskoy ghubi (Karskoe more) // Tr. Desiyatoy mejdunarodnoy konferencii po merzlotovedeniu. Salehard. 2012. T. 3. S. 365—368.
- [15] Romanenko F. A. Intensivnost geomorfologiceskih processov na ostrovah i poberejyah morey Karskogo i Laptevih (po materialam nabludeniy poliyarnih stanciy) // Geomorfologiya. 2008. N 1. S. 56—64.
- [16] Safiyanov G. A. Geomorfologiya morskikh beregov. M., 1996. 400 s.
- [17] Smirnov V. M. Stroenie i razvitie beregov Karskogo moria // Bulletin MOIP. Otdel geologiceskiy. 1988. T. 63, vip. 3. S. 118—125.
- [18] Smirnov I. P. Dinamika pribrejnih landschaftov na severo-vostoke ostrova Severniy arhipelaga Novaiya Semliya // Izv. RGO. 2015. T. 147, vip. 3. S. 30—41.
- [19] Tarakanov L. V. K voprosu o proishojdenii relief ostrova Vaygach // Geomorfologiya. 1973. N 4. S. 85—91.
- [20] Tolmacev A. I. Metodi sravnitelnoy floristiki i problemi florogenesa. Novosibirsk, 1986. 190 s.

Изв. РГО. 2016. Т. 148, вып. 1

ОЦЕНКА БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА ВСЛЕДСТВИЕ ВСЕЛЕНИЯ ПОЛИХЕТ *MARENZELLERIA* SPP. ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

© Т. Р. ЕРЁМИНА,* Е. В. ВОЛОЩУК,* А. А. МАКСИМОВ**

* Российский государственный гидрометеорологический университет

** Зоологический институт Российской академии наук

E-mail: ketrin492006@mail.ru

Полихеты *Marenzelleria* spp., вселившиеся в Балтийское море, за короткий промежуток времени стали причиной значительных биогеохимических изменений в донных отложениях, которые затрагивают циклы азота и фосфора, играющих определяющую роль в эвтрофировании морских вод. Для анализа изменений биогеохимических процессов в условиях инвазии полихет проведены натурные исследования поровых вод и донных отложений в восточной части Финского залива. Для прогноза возможных изменений, обусловленных воздействием *Marenzelleria* spp., использовалась диагенетическая модель CANDI (carbon and nutrient diagenesis — диагенез углерода и биогенных элементов). Результаты моделирования показали, что через 5 лет на станции с высокой численностью полихет могут наблюдаться более низкие запасы фосфатов (в 2.6 раза), аммония (в 1.6 раза), а также более высокие запасы сульфатов (в 1.5 раза) в поровой воде и железа в донных отложениях (в 7 раз) по сравнению со станцией с низкой численностью *Marenzelleria* spp. Запас нитратов на обеих исследуемых станциях практически одинаков. Сделан вывод о различии в механизмах функционирования бентосных экосистем в будущем в условиях высокой и низкой численности вида-вселенца.

Ключевые слова: инвазионные виды, биогеохимические процессы, бентосный слой, моделирование, Финский залив.

Введение. В 2008 г. в восточной части Финского залива появились устойчивые к гипоксии арктические полихеты *Marenzelleria arctica*. К 2009 г. эти

полихеты заселили огромные площади участков дна глубоководной зоны, оккупировав большую часть акватории Финского залива, и стали ведущим, а местами практически единственным представителем макрозообентоса [6]. Полихеты рода *Marenzelleria* включают 6 видов ([23], с. 2046), 3 из которых (*Marenzelleria arctica*, *M. neglecta* и *M. viridis*) на рубеже XX и XXI вв. вселились в Балтийское море [9–11]. Поскольку эти близкие виды трудноразличимы, точное видовое название часто остается неизвестным. В большинстве публикаций виды этого рода рассматривают вместе как *Marenzelleria* spp. Данное написание использовано и в настоящей работе.

Вселение *Marenzelleria* spp. привело к появлению в Балтийском море новой функциональной группы донных животных. Особенности этих полихет состоят в том, что, во-первых, они устойчивы к гипоксическим явлениям, часто наблюдающимся на дне Финского залива [3, 15], и, во-вторых, способствуют интенсификации процессов биотурбации и биоирригации, вследствие которых происходит обогащение кислородом более глубоких слоев донных отложений. В восточной части Финского залива наряду со значительной внешней биогенной нагрузкой с огромного и густонаселенного водосбора существенную роль в балансе биогенных элементов играют внутриводоемные процессы: поступление из донных осадков и транспорт с придонными течениями из западных районов залива [4]. Значительный вклад внутренней биогенной нагрузки в эвтрофирование восточной части Финского залива делает экосистему этого водоема чувствительной к изменениям придонных процессов, которые в свою очередь зависят от окислительно-восстановительных условий. Так, хорошо известно, что в окислительных условиях фосфаты (рис. 1) имеют способность адсорбироваться на поверхности свежесформированных оксидов/гидроксидов металлов, прежде всего железа [8, 21, 25], и таким образом переходить в захороненное состояние. При смене окислительно-восстановительных условий процессы идут в обратном направлении: комплекс Fe—P разрушается, происходит выход фосфатов из донных отложений. В результате их концентрация в поровой воде возрастает. Железо в свою очередь посредством диффузии перемещается в окислительную зону, и цикл повторяется.

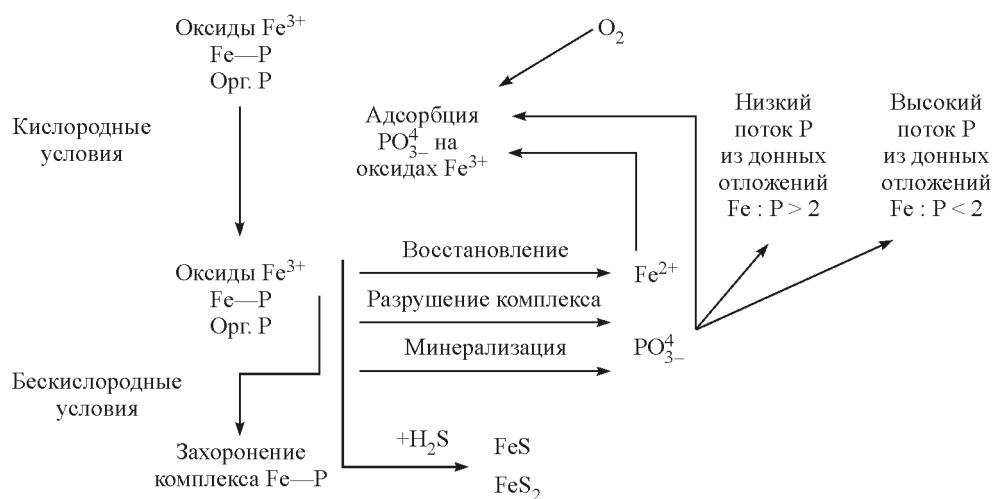


Рис. 1. Цикл соединений фосфора и железа на барьере вода—донные осадки.

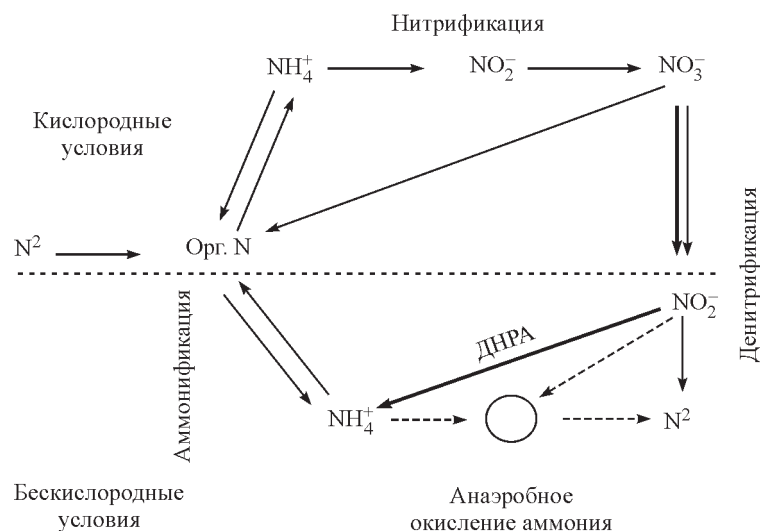


Рис. 2. Цикл соединений азота на барьере вода—донные осадки.

Однако чем дольше комплекс Fe—P находится в захороненном состоянии, тем более устойчивым он становится и тем меньше подвержен разрушению [21].

При анаэробном разложении органического вещества образуется аммоний (рис. 2), который окисляется до нитритов и далее до нитратов. В анаэробных условиях происходят три основных процесса: денитрификация (восстановление нитратов до молекулярного азота), анаэробное окисление аммония (реакция окисления аммония нитритами с образованием молекулярного азота) и диссимиляторная нитрат-редукция до аммония (ДНРА). Первые две реакции приводят к образованию газа N_2 , который выделяется в атмосферу, и его содержание в морской среде снижается [16, 17]. В результате реакции ДНРА образующийся NH_4^+ сохраняется в морской среде.

ДНРА преобладает над процессом денитрификации в условиях повышенного содержания органического вещества (высокое соотношение $C_{орг}/NO_3^-$), интенсивной сульфат-редукции и более высоких температур. Потепление климата, заметно выраженное в последние два десятилетия в Балтийском регионе [2], в совокупности с процессом эвтрофикации способствуют накоплению N в морской экосистеме.

Изменение соотношения азот/фосфор приводит к значительным изменениям в водной экосистеме, прежде всего к смене доминирующих сообществ фитопланктона [1, 5]. Соотношение N:P в восточной части Финского залива имеет четкую закономерность в изменении с запада на восток (табл. 1). В конце XX—начале XXI в. наблюдаемые соотношения N:P изменялись от 30 в Невской губе до 2.1—2.9 во внешнем глубоководном районе.

За период крупномасштабного вселения полихет *Marenzelleria* spp. отмечено значительное увеличение соотношения N:P в глубоководном районе залива, что повлекло за собой каскадные изменения в планктоне [7].

В связи с этим актуальной представляется задача оценки и прогноза биогеохимических изменений в донных отложениях, обусловленных жизнедеятельностью инвазионных видов. Для решения этой задачи используются

Таблица 1

Соотношение азот/фосфор в различных районах восточной части Финского залива по данным наблюдения в июне—ноябре 1996—2002 гг. [24]

Район	Границы района [22]	N:P
Внешний глубоководный	О-в Гогланд—трансекта о-ва Березовые—о-в Сескар	2.1—2.9
Внутренний глубоководный	От трансекты о-ва Березовые—о-в Сескар до трансекты мыс Шепелевский—мыс Флотский	3.0
Мелководный	От трансекты мыс Шепелевский—мыс Флотский до о-ва Котлин	3.7
Невская губа	О-в Котлин—бар р. Нева	30

результаты натурных измерений и разработанная математическая модель биогеохимических процессов в донных отложениях. В настоящий момент подобная оценка выполнена только для района Балтийского моря вблизи г. Стокгольм [21]. В данной работе на основе бентосной диагенетической модели CANDI [12] проведена оценка изменений, произошедших в донных осадках восточной части Финского залива после вселения полихет.

Материалы и методы. Данные натурных наблюдений, использованные в статье, были получены в сентябре 2013 г. в экспедиции Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) в восточной части Финского залива. Схема расположения шести станций отбора проб придонной воды и донных отложений представлена на рис. 3.

Станции для отбора проб выбирались таким образом, чтобы захватить участки залива с высокой и низкой численностью полихет.

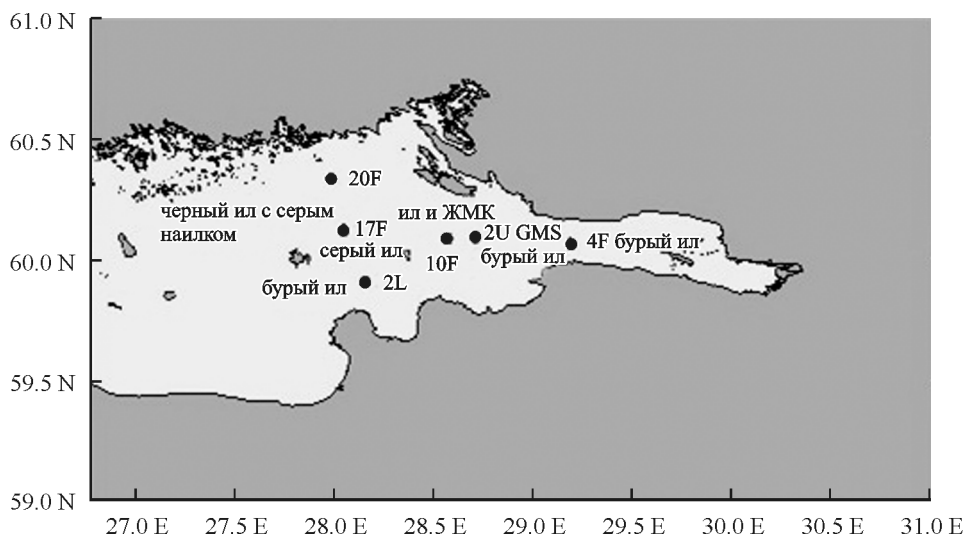


Рис. 3. Схема станций восточной части Финского залива, на которых был произведен отбор проб воды и донных отложений в сентябре 2013 г.

Отбор проб придонной воды производился батометром на расстоянии 1 м от дна. Донные отложения отбирались дночерпателем Ван-Вина и затем нарезались слоями толщиной 1—2 см. Иловые воды отжимались из пробы грунта с использованием настольной центрифуги СМ-6М в течение часа при скорости примерно 2500 оборотов/мин. Далее иловая вода разбавлялась до объема 1 л и проводились измерения концентраций растворенных веществ.

Определение концентраций растворенного кислорода (O_2) в придонных водах проводилось иодометрическим методом. Химический анализ проб поровых вод на содержание растворенных фосфатов, нитратов, нитритов, аммония, валового железа (ΣFe) и валового марганца (ΣMn) выполнялся в лаборатории РГГМУ фотометрическим методом, сульфатов — турбидиметрическим методом.

Анализ проб твердой фазы донных отложений был выполнен в лаборатории Атлантического отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Были получены данные количественного химического анализа содержаний органического углерода (C_{org}), валовое содержание марганца (ΣMn) и железа (ΣFe) (в %) в пробах донных осадков Финского залива. Для определения биомассы и численности *Marenzelleria* spp. и других бентосных организмов на исследуемых станциях отбирали 5 проб дночерпателем Ван-Вина (площадь захвата 0.025 м^2). Собранный грунт промывали через сито с ячейей 0.4 мм. Остаток фиксировали 4%-м формалином. Обработку материала проводили в лаборатории Зоологического института РАН по обычной методике.

Описание бентосной модели. Диагенетическая модель CANDI (carbon and nutrient diagenesis) [12] позволяет получить вертикальные профили концентрации биогенных элементов, окислителей, а также органического вещества и ряда других веществ в поровой воде и твердой фазе донных отложений в различные моменты времени.

Модель включает описание 6 стандартных реакций окисления органического вещества согласно схеме Моно: аэробное дыхание, денитрификация, восстановление оксида марганца и оксида железа, сульфат-редукция, а также метаногенез. Восстановленные вещества, образовавшиеся в ходе этих реакций (NH_4^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} , H_2S и CH_4), могут также участвовать в реакциях окисления, адсорбции или осаждения.

В модель включены также такие процессы, как биотурбация, молекулярная диффузия, адвекция, биоирригация. В результате биоирригации [20] усиливается интенсивность обмена поровой воды с придонными водами. Чем выше численность бентосных организмов, выкапывающих норы в донных отложениях, тем интенсивнее обмен поровых и вышележащих вод и тем выше коэффициент биоирригации. Использование модели позволяет количественно оценить вклад биоирригации в биохимические процессы на дне залива.

Результаты. Анализ данных натурных наблюдений показал, что в период проведения исследований кислородные условия в придонном слое восточной части Финского залива в целом были благоприятные. На большей части станций содержание растворенного кислорода в придонном слое (1—2 м от дна) не опускалось ниже 2 мг/л (рис. 4). Исключением являлась глубоководная (46 м) станция 20F, на которой концентрация кислорода составляла всего 1.16 мг/л.

Донные отложения восточной части Финского залива на станциях 2L, 2UGMS, 10F и 4F были представлены бурым окисленным илом. На станции 17F обнаружены серые илы, что свидетельствует о смене окислительно-вос-

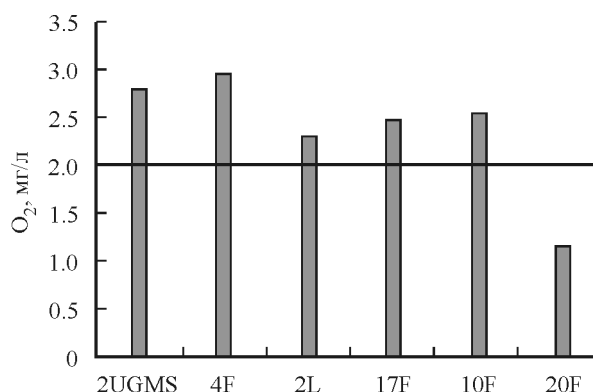


Рис. 4. Содержание кислорода в придонном слое воды на станциях восточной части Финского залива в сентябре 2013 г.

становительных условий; на станции 20F донные отложения представлены сероводородным черным илом с серым наилком (наличие сероводорода в донных отложениях было выявлено органолептически в момент отбора проб).

Результаты экспедиционных исследований по численности и биомассе полихет *Marenzelleria* spp. (табл. 2) показали, что их численность значительно изменялась от максимальных значений 3912 экз/м² на станции 2UGMS до минимальных значений 240 экз/м² на станции 20F. На рис. 5 и 6 приводятся данные по содержанию различных веществ в поровой воде и твердой фазе донных отложений на четырех станциях восточной части Финского залива в сентябре 2013 г. (станции 2UGMS и 2L с высокой численностью полихет *Marenzelleria* spp., 17F и 20F — с низкой). Ввиду ограниченного количества проб, взятых на станциях 4F и 10F, данные по этим станциям не приводятся.

Как видно на рис. 5 (а, б) концентрации фосфатов в поровой воде донных отложений на станциях 2UGMS и 2L находятся в пределах 0.1—0.2 ммоль/л. Гипоксические условия на дне станции 20F приводят к высвобождению фосфатов из твердой фазы донных отложений, в результате чего их концентрация в

Таблица 2

Численность и биомасса полихет рода *Marenzelleria* spp. (± стандартная ошибка) в донных отложениях в восточной части Финского залива в сентябре 2013 г.

Станция	Численность, экз/м ²	Биомасса, г/м ²
2L*	2928 ± 134	52.78 ± 4.44
17F	1328 ± 246	28.27 ± 6.13
20F	240 ± 40	3.27 ± 0.97
4F*	3784 ± 223	38.78 ± 3.49
2UGMS*	3912 ± 198	38.93 ± 3.06
10F	1064 ± 20	10.59 ± 0.31

Примечание. * — станции с высокой численностью *Marenzelleria* spp.

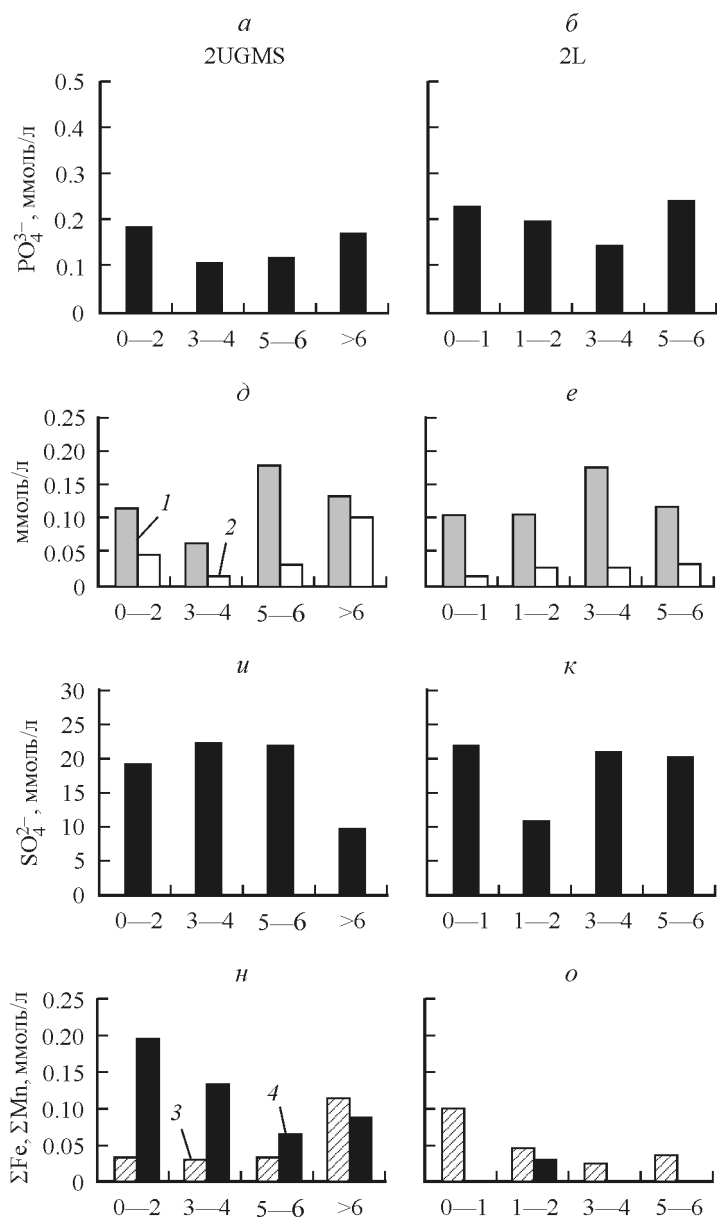


Рис. 5. Содержание химических веществ в поровой воде на станциях восточной части Финского залива в сентябре 2013 г.

По горизонтальной оси — горизонт в (см). а—г, и—м: пояснения в тексте; д—з: 1 — $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$, 2 — NH_4 ; н—р: 3 — ΣFe , 4 — ΣMn .

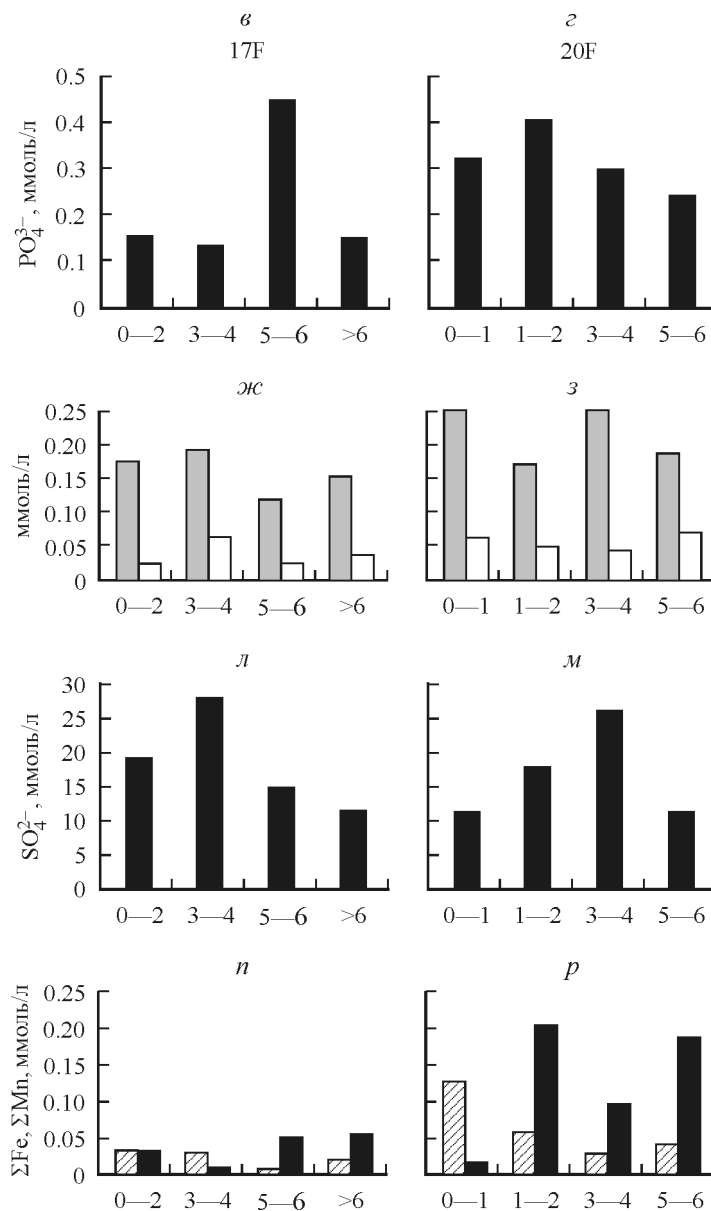


Рис. 5 (продолжение).

поровой воде возрастает (рис. 5, з). На станции 17F, по всей видимости, по этой же причине происходит рост концентрации фосфатов в слое 3—4 см.

На исследуемых станциях концентрация окисленной формы азота преобладает над восстановленной (рис. 5, д—з). В целом концентрация нитратов+нитритов, а также аммония выше на станциях с низкой численностью *Marenzelleria* spp.

Незначительными являются различия в содержании растворенных сульфатов на исследуемых станциях: на разных горизонтах их концентрация составляла в среднем 16—18 ммоль/л.

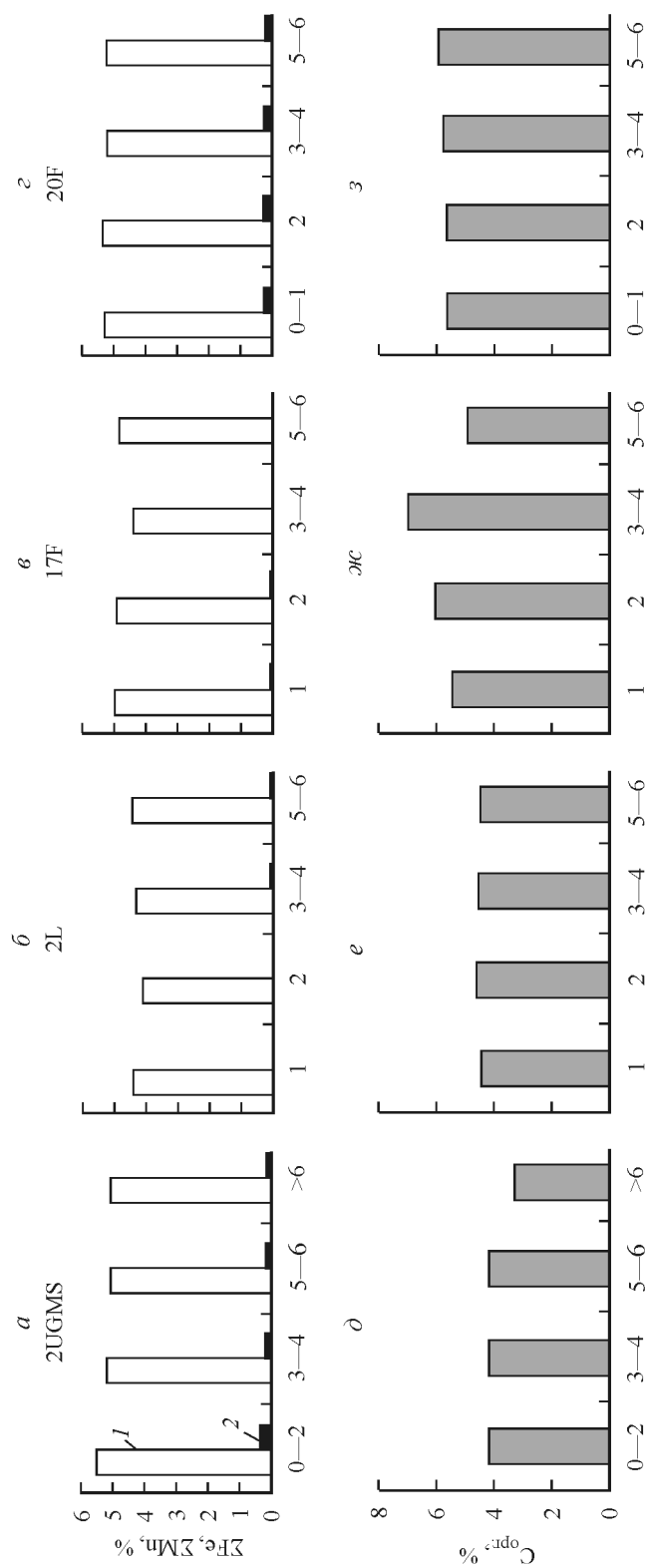


Рис. 6. Содержание ΣFe (1), ΣMn (2) и C_{org} (%) в донных отложениях на станциях восточной части Финского залива в сентябре 2013 г. (а—з). По горизонтальной оси — горизонт (см).

Самое высокое содержание растворенного марганца наблюдается на станции 20F, в среднем 0.15 ммоль/л, что значительно выше, чем на станциях 2L и 17F. На станциях с высокой численностью *Marenzelleria* spp. наблюдается несколько более высокое содержание растворенного общего железа, что в сумме с более низкой концентрацией фосфатов на этих станциях приводит к росту отношения Fe/P — показателя доступности железа для связывания фосфатов. При этом диаграммы содержания железа в твердой фазе донных отложений не выявляют значительного расхождения между исследуемыми станциями, составляя в среднем 4.5—5.5 %. Валовое содержание марганца на станции 20F несколько выше, чем для остальных станций, в среднем 0.25—0.30 %.

Как показано на рис. 6, d—з, на станциях 2UGMS и 2L (т. е. на станциях с высокой численностью полихет *Marenzelleria* spp.) содержание органического углерода в различных горизонтах донных отложений колеблется в пределах 3—5 %, на станциях 17F и 20F содержание органического углерода несколько выше и находится в пределах 5—7 %.

Результаты моделирования. Данные наблюдений, полученные в ходе экспедиции, являются весьма ограниченными: гидрохимические пробы для некоторых станций дают представление о содержании веществ интегрально в слое 0—2, 3—4 см и при этом в фиксированный момент времени. Полученные значения характеристик являются результатом действия совокупности различных факторов и процессов (рельеф, температура, течения, седиментация и т. д.), что усложняет интерпретацию этих данных с точки зрения деятельности полихет *Marenzelleria* spp. В этом случае применение бентосной модели диагенеза позволит дать более точную количественную оценку влияния ирригационной активности полихет на биогеохимические процессы в донных отложениях за счет задаваемого более высокого вертикального разрешения, а также возможность спрогнозировать дальнейшие изменения. Для данной оценки были выбраны 2 станции: 2UGMS — станция с высокой численностью полихет рода *Marenzelleria* spp. и станция 17F — с низкой численностью. Для этих станций на основе полученных данных по численности полихет (N) были рассчитаны: радиус вырытых червями норок (r), фактор биоирригации (γ) и коэффициент биоирригации (α) (табл. 3).

С использованием бентосной диагенетической модели CANDI были проведены численные эксперименты, результатом которых являются установившиеся (через 5 лет счета) вертикальные распределения концентрации фосфатов, нитратов, аммония и сульфатов в поровой воде, а также железа в твердой фазе донных отложений на исследуемых станциях 2UGMS и 17F восточной части Финского залива (рис. 7). Вертикальные профили рассчитывались до глубины 10 см, т. е. в слое активной биоирригационной деятельности полихет.

Таблица 3

Численность полихет *Marenzelleria* spp. (N) на двух станциях восточной части Финского залива в сентябре 2013 г., рассчитанные радиус вырытых червями норок (r), фактор (γ) и коэффициент биоирригации (α)

Станция	$N \pm \text{СКО, экз./м}^2$	r , см	γ , см ⁻²	α , год ⁻¹
2UGMS	3912 $\pm$ 198	0.18	1.33	483
17F	1328 $\pm$ 246		0.15	55

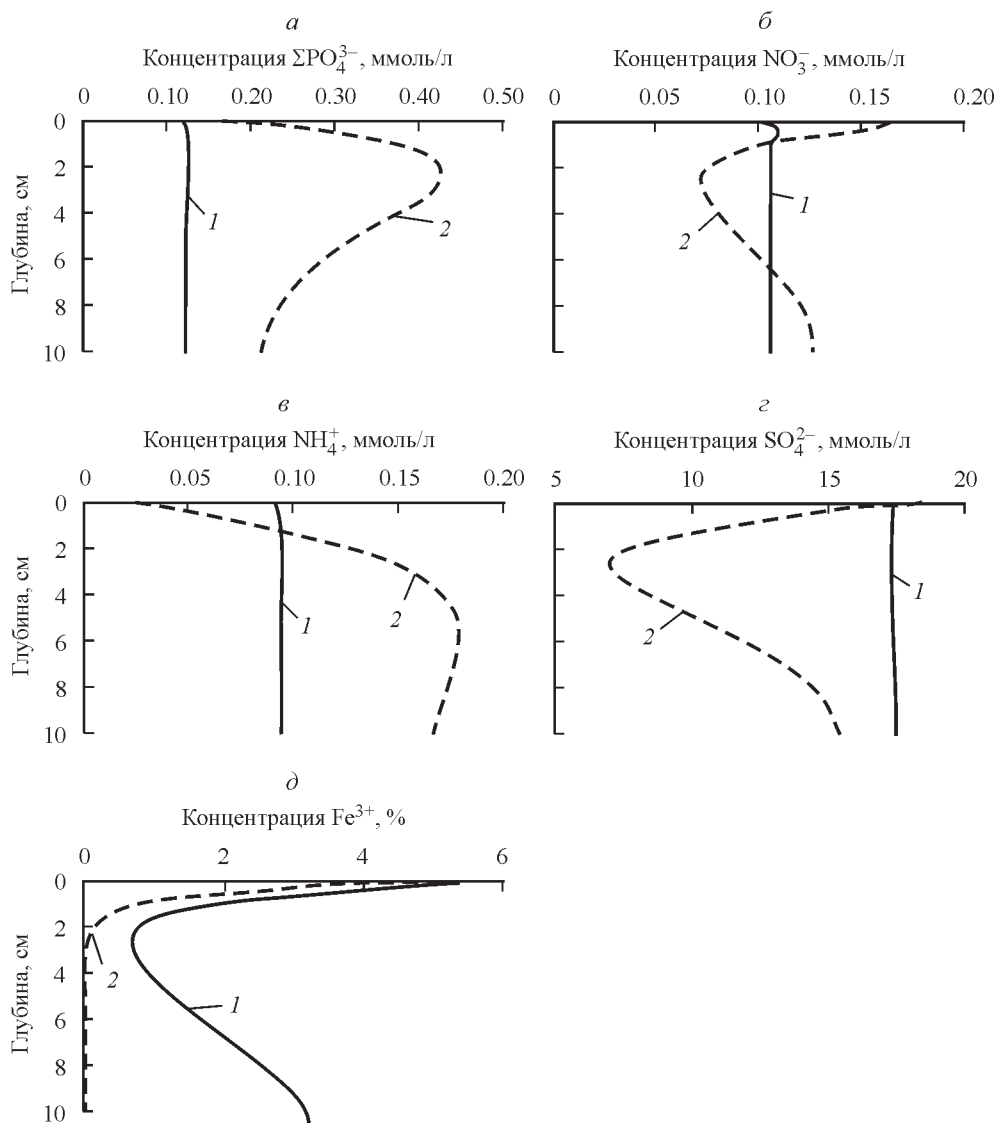


Рис. 7. Вертикальные профили распределения химических веществ в поровой воде и твердой фазе донных отложений для двух станций восточной части Финского залива по данным моделирования (а—д).

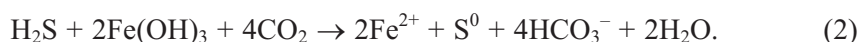
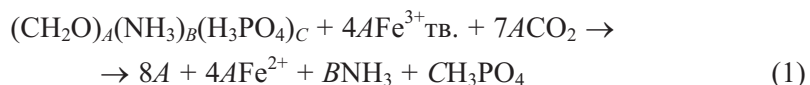
1 — результаты моделирования для станции 2UGMS, 2 — то же для станции 17F.

Обсуждение. Как указывалось выше, содержание органического углерода в твердой фазе донных отложений несколько ниже на станциях с высокой численностью *Marenzelleria* spp., что согласуется с результатами работы [21], в которой отмечалось, что присутствие полихет *Marenzelleria* spp. в донных отложениях приводит к снижению захоронения неустойчивого органического углерода.

Вследствие более высокой численности полихет *Marenzelleria* spp. на станции 2UGMS, интенсивность процессов биотурбации и биоирригации чер-

вами также выше. В результате этих процессов происходит проникновение кислорода в более глубокие слои донных отложений и увеличивается объем окисленных осадков.

В окислительных условиях гидроксиды железа адсорбируют на своей поверхности фосфаты. Хорошо кристаллизованные гидроксиды железа, со временем формирующиеся из аморфных видов, становятся недоступными для реакции диссимиляторного восстановления железа (1), однако могут быть восстановлены сероводородом (2) ([²¹]), с. 429), поскольку захораниваются ниже зоны биоирригации:

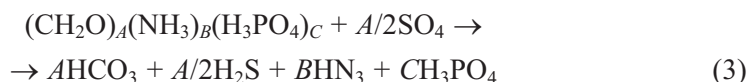


Здесь $(\text{CH}_2\text{O})_A(\text{NH}_3)_B(\text{H}_3\text{PO}_4)_C$ — органическое вещество, A, B, C — стехиометрические коэффициенты.

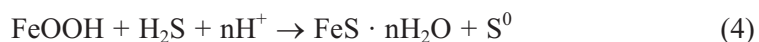
Обобщая все вышесказанное, а также учитывая зависимость содержания фосфора в донных отложениях от плотности популяции полихет [²¹], получаем в 2.6 раза более высокий запас растворенных фосфатов в слое 0—10 см для станции 17F по сравнению со станцией 2UGMS.

За счет менее благоприятных кислородных условий на станции 17F, как видно на рис. 7, *в*, происходит рост по профилю концентрации аммонийного азота, содержание нитратов имеет минимум на глубине 2 см (рис. 7, *б*), однако затем повышается.

Свободный кислород исчезает уже в нескольких миллиметрах верхнего слоя донных отложений ([¹⁹], с. 303), ниже которого доминируют процессы анаэробной минерализации. Поскольку нитраты и оксиды марганца играют менее важную роль в процессе минерализации [¹⁴], двумя основными процессами становятся диссимиляторное восстановление железа (1) и диссимиляторная сульфат-редукция (3):



и далее



с возможностью формирования пирита



Главное отличие экологических последствий двух данных механизмов состоит в следующем: в процессе восстановления железа (1) растворенное Fe^{2+} может посредством диффузии вновь оказаться в окисленном слое и образовывать оксиды, в то время как при реакции сульфат-редукции конечные продукты (FeS и FeS_2) захораниваются в аноксийных условиях [¹³].

Результаты моделирования, полученные для исследуемых станций, показывают следующее соотношение двух вышеописанных механизмов (табл. 4).

Таблица 4

Окисление органического углерода

Окислитель	С (%), окисляемый веществами	
	Станция 17F	Станция 2 UGMS
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	16	32
SO_4^{2-}	76	36

Таким образом, на станции 17F окисление органического углерода ведет к преимущественному образованию сероводорода и осаждению железа (3 и 4), чем и обусловлены резкое падение содержания Fe^{3+} в донных отложениях на данной станции (рис. 7, д) и снижение концентрации сульфатов в поровой воде (рис. 7, з).

По полученным результатам моделирования для исследуемых станций были рассчитаны соотношения запасов веществ в поровой воде и твердой фазе донных отложений. Так, через 5 лет в 10-сантиметровом слое донных отложений для станции 2UGMS получены более высокие запасы сульфатов (в 1.5 раза) в поровой воде и железа в донных отложениях (в 7 раз) по сравнению со станцией 17F. Для станции 17F были получены более высокие запасы фосфатов (в 2.6 раза), а также аммония (в 1.6 раза) и неорганических соединений азота (аммония и нитратов) (в 1.3 раза).

В работе [7] на основе данных натурных наблюдений в восточной части Финского залива в 2004—2011 гг. было показано, что после вселения *Marenzelleria* spp. концентрация азота (нитритного и нитратного) в придонном горизонте возросла почти в 4 раза в среднем за период 2009—2011 гг. по сравнению с доинвазионным периодом (2004—2007 гг.). Авторами сделан вывод, что вселение полихет привело к увеличению чистого поступления азотистых веществ из осадков в воду вследствие экскреции их самими животными и биотурбации донных отложений. Полученное в данном исследовании более низкое содержание азота (нитратов и аммония) в поровых водах донных отложений станций с высокой численностью полихет также, по-видимому, связано с более интенсивным выходом соединений азота из донных осадков в толщу воды. Снижение концентрации азота в поровых водах вследствие деятельности червей было отмечено и в экспериментальных исследованиях [18].

Выводы

Анализ натурных данных показал, что существуют заметные различия в содержании ряда химических соединений в составе поровых вод и твердой фазы донных отложений в условиях различной численности вида-вселенца *Marenzelleria* spp. Собранный материал является уникальным, поскольку подобные комплексные измерения проводятся в восточной части Финского залива впервые. Однако поскольку использованный способ отбора проб донных отложений довольно груб для получения вертикального распределения исследуемых характеристик, полученные данные требуют уточнения и проведения дополнительных исследований по анализу содержания различных химических веществ в поровых водах и донных отложениях.

Для количественной оценки биогеохимических изменений в донных отложениях вследствие инвазии полихет в настоящем исследовании была применена бентосная диагенетическая модель CANDI. Результаты моделирования выявляют разницу в механизмах функционирования бентосных экосистем в будущем. Важно также отметить, что в результате моделирования были выявлены значительные различия в запасах различных соединений, например, фосфатов, аммония, сульфатов в поровой воде и железа в твердой фазе донных отложений в условиях высокой и низкой численности популяции *Marenzelleria* spp. Так, например, по результатам моделирования через 5 лет запасы фосфатов в поровой воде на станции с высокой численностью *Marenzelleria* spp. могут быть в 2.6 раза ниже, а железа твердой фазы донных отложений в 7 раз выше в сравнении со станцией с низкой численностью червей. В условиях высокой численности полихет запасы азота (в форме аммония и нитратов) в поровой воде в 1.3 раза ниже по сравнению со станцией с низкой численностью полихет.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ : РГО_а № 13-05-41464 и БОНУС_а № 14-04-91721 (COCOA BONUS).

Список литературы

- [1] Булгаков Н. Г., Левич А. П. Биогенные элементы в среде и фитопланктон: отношение азота к фосфору как самостоятельный регулирующий фактор // Успехи современной биологии. 1995. Т. 15, № 1. С. 13—23.
- [2] Ерёмкина Т. Р., Бугров Л. Ю., Максимов А. А., Рябченко В. А., Шилин М. Б. Воздействия изменения климата на морские природные системы // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Фед. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2014. С. 615—643.
- [3] Ерёмкина Т. Р., Максимов А. А., Волощук Е. В. Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива // Океанология. 2012. Т. 52, № 6. С. 1—9.
- [4] Исаев А. В. Количественные оценки пространственно-временной изменчивости абиотических характеристик экосистемы восточной части Финского залива на основе данных наблюдений и математического моделирования. Дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2010. 21 с.
- [5] Левич А. П., Максимов В. Н., Булгаков Н. Г. Теоретическая и экспериментальная экология фитопланктона: управление структурой и функциями сообществ. М.: Изд-во НИЛ, 1997. 192 с.
- [6] Максимов А. А. Крупномасштабная инвазия *Marenzelleria* spp. (Polychaeta; Spionidae) в восточной части Финского залива Балтийского моря // Российский журнал биологических инвазий. 2010. № 4. С. 19—31.
- [7] Максимов А. А., Ерёмкина Т. Р., Ланге Е. К., Литвинчук Л. Ф., Максимова О. Б. Режимная перестройка экосистемы восточной части Финского залива вследствие инвазии полихет *Marenzelleria arctica* // Океанология. 2014. Т. 54, № 1. С. 52—59.
- [8] Almroth-Rosell E., Eilola K., Kuznetsov I., Hall P., Meier M. A new approach to model oxygen dependent benthic phosphate fluxes in the Baltic Sea // Journal of Marine Systems. 2015. N 144. P. 127—141.
- [9] Bastrop R. R. Where did *Marenzelleria* spp. (Polychaeta: Spionidae) in Europe come from? // Aquat. Ecol. 1997. N 31. P. 119—136.

- [10] Bick A. and Burckhard R. First evidence of *Marenzelleria viridis* Polychaeta (Spionidae) for the Baltic Sea region, with a sorting key for spionides of the Baltic Sea // Mitt. Zool. Mus. 1989. Berl., N 65. P. 237—247.
- [11] Blank M., Laine A. O., Jürss K. K., Bastrop R. Molecular identification key based on PCR/RFLP for three polychaete sibling species of the genus *Marenzelleria*, and the species' current distribution in the Baltic Sea // Helgol. Mar. Res. 2008. Vol. 62. P. 129—141.
- [12] Boudreau B. P. A method-of-lines code for carbon and nutrient diagenesis in aquatic sediments // Computers and Geosciences. 1996. Vol. 22. P. 479—496.
- [13] Canfield D. E. Reactive iron in marine sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 1989. Vol. 53. P. 619—632.
- [14] Canfield D. E., Thamdrup B., Kristensen E. Aquatic Geomicrobiology // Advances in Marine Biology. 2005. V. 48.
- [15] Conley D. J., Björck S., Bonsdorff E. et al. Hypoxia related processes in the Baltic Sea // Environmental science and technology. 2009. V. 43, N 10. P. 3412—3420.
- [16] Hietanen S. Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in sediments of the Gulf of Finland // Aquatic microbial ecology. 2007. V. 48. P. 197—205.
- [17] Koeve W. and Kähler P. Heterotrophic denitrification vs. autotrophic anammox — quantifying collateral effects on the oceanic carbon cycle // Biogeosciences. 2010. N 7. P. 2327—2337.
- [18] Kristensen E., Hansen T., Delefosse M. et al. Contrasting effects of the polychaetes *Marenzelleria viridis* and *Nereis diversicolor* on benthic metabolism and solute transport in sandy coastal sediment // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2011. T. 425. P. 125—139.
- [19] Lehtoranta J. and Ekholm P., Pitkänen H. Coastal eutrophication threshold: a matter of sediment microbial processes // Ambio. 2009. V. 38, N 6. P. 303—308.
- [20] Meysman F., Middelburg J., and Heip C. Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea // TRENDS in Ecology and Evolution. 2006. V. 21, N 12. P. 688—695.
- [21] Norkko J., Reed D. C., Timmermann K., Norkko A. et al. A welcome can of worms? Hypoxia mitigation by an invasive species // Global Change Biology. 2012. V. 18, N 2. P. 422—434.
- [22] Pitkänen H. Nutrient dynamics and conditions in the eastern Gulf of Finland: the regulatory role of the Neva estuary // Aqua Fennica. 1991. N 21 (2). P. 105—115.
- [23] Renz J. R. and Forster S. Are similar worms different? A comparative tracer study on bioturbation in the three sibling species *Marenzelleria arctica*, *M. viridis*, and *M. neglecta* from the Baltic Sea // Limnology and Oceanography. 2013. V. 58. P. 2046—2058.
- [24] Savchuk O., Eremina T., Isaev A., Neelov I. Response of eutrophication in the eastern Gulf of Finland to nutrient load reduction scenarios // Hydrobiologia. 2009. V. 629. P. 225—237.
- [25] Sundby B., Gobeil C., Silverberg N., Mucci A. The phosphorus cycle in coastal marine sediments // Limnology and Oceanography. 1992. V. 37. P. 1129—1145.

Поступило в редакцию
22 июня 2015 г.

Assessment of biogeochemical changes in the sediments of the Eastern part of the Gulf of Finland due to invasion of polychaetes *Marenzelleria* spp. on evidence from observation data and modeling results

© T. R. Eremina,* E. V. Voloshchuk,* A. A. Maximov**

* Russian State Hydrometeorological University

** Zoological Institute of Russian Academy of Sciences

E-mail: ketrin492006@mail.ru

Species *Marenzelleria* spp. that invaded the Baltic Sea for several years became a leader of significant biogeochemical changes in the sediments that affect cycles of nutrients, nitrogen and phosphorus, that play a major role in eutrophication. Field observations of pore water and solid phase of the sediments were held in the Eastern part of the Gulf of Finland for assess changes of biogeochemical processes due to polychaetes invasion. For the projection of possible future changes as a consequence of *Marenzelleria* spp. impact, diagenetic model CANDI (carbon and nutrient diagenesis) is used. The simulation results show that in 5 years there might be lower stores of phosphates (in 2.6 times), ammonium (1.6 times), as well as higher stores of sulphate (1.5 times) in pore water and iron in the sediments (7 times) on the station with high abundance of polychaetes compared to the station with low density of *Marenzelleria* spp. The stores of nitrates in two stations are practically the same. Concluded, that in conditions of high and low abundance of invasive species different mechanisms are working in the ecosystems.

Key words: invasive species, biogeochemical processes, benthic layer, modeling, Gulf of Finland.

References

- [1] Bulgakov N. G., Levich A. P. Biogennyye jelementy v srede i fitoplankton: otnoshenie azota k fosforu kak samostojatel'nyj regulirujushhij faktor // Uspehi sovremennoj biologii. 1995. T. 15, N 1. S. 13—23.
- [2] Erjomina T. R., Bugrov L. Ju., Maksimov A. A., Rjabchenko V. A., Shilin M. B. Vozdejstviya izmenenija klimata na morskije prirodnye sistemy // Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. M.: Fed. Sluzhba po Gidrometeorologii i monitoringu okruzhajushhej sredy, 2014. S. 615—643.
- [3] Erjomina T. R., Maksimov A. A., Voloshchuk E. V. Vlijanie izmenchivosti klimata na kislorodnyj rezhim glubinnyh vod vostochnoj chasti Finskogo zaliva // Okeanologija. 2012. T. 52, N 6. S. 1—9.
- [4] Isaev A. V. Kolichestvennye ocenki prostranstvenno vremennoj izmenchivosti abioticheskikh harakteristik jekosistemy vostochnoj chasti Finskogo zaliva na osnove dannyh nabljudenij i matematicheskogo modelirovanija: Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskikh nauk. SPb., 2010. 21 c.
- [5] Levich A. P., Maksimov V. H., Bulgakov N. G. Teoreticheskaja i jeksperimental'naja jekologija fitoplanktona: upravlenie strukturoj i funkcijami soobshhestv. M.: Izd-vo NIL, 1997. 192 s.
- [6] Maksimov A. A. Krupnomasshtabnaja invazija *Marenzelleria* spp. (Polychaeta; Spionidae) v vostochnoj chasti Finskogo zaliva Baltijskogo morja // Rossijskij zhurnal biologicheskikh invazij. 2010. N 4. S. 19—31.
- [7] Maksimov A. A., Erjomina T. R., Lange E. K., Litvinchuk L. F., Maksimova O. B. Rezhimnaja perestrojka jekosistemy vostochnoj chasti Finskogo zaliva vsledstvie invazii polihet *Marenzelleria* arctica // Okeanologija. 2014. T. 54, N 1. S. 52—59.
- [8] Almroth-Rosell E., Eilola K., Kuznetsov I., Hall P., Meier M. A new approach to model oxygen dependent benthic phosphate fluxes in the Baltic Sea // Journal of Marine Systems. 2015. N 144. P. 127—141.

- [9] Bastrop R. R. Where did *Marenzelleria* spp. (Polychaeta: Spionidae) in Europe come from? // Aquat. Ecol. 1997. N 31. P. 119—136.
- [10] Bick A. and Burckhard R. First evidence of *Marenzelleria viridis* Polychaeta (Spionidae) for the Baltic Sea region, with a sorting key for spionides of the Baltic Sea // Mitt. Zool. Mus. 1989. Berl., N 65. P. 237—247.
- [11] Blank M., Laine A. O., Jürss K. K., Bastrop R. Molecular identification key based on PCR/RFLP for three polychaete sibling species of the genus *Marenzelleria*, and the species' current distribution in the Baltic Sea // Helgol. Mar. Res. 2008. Vol. 62. P. 129—141.
- [12] Boudreau B. P. A method-of-lines code for carbon and nutrient diagenesis in aquatic sediments // Computers and Geosciences. 1996. Vol. 22. P. 479—496.
- [13] Canfield D. E. Reactive iron in marine sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 1989. Vol. 53. P. 619—632.
- [14] Canfield D. E., Thamdrup B., Kristensen E. Aquatic Geomicrobiology // Advances in Marine Biology. 2005. V. 48.
- [15] Conley D. J., Björck S., Bonsdorff E. et al. Hypoxia related processes in the Baltic Sea // Environmental science and technology. 2009. V. 43, N 10. P. 3412—3420.
- [16] Hietanen S. Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in sediments of the Gulf of Finland // Aquatic microbial ecology. 2007. V. 48. P. 197—205.
- [17] Koeve W. and Kähler P. Heterotrophic denitrification vs. autotrophic anammox — quantifying collateral effects on the oceanic carbon cycle // Biogeosciences. 2010. N 7. P. 2327—2337.
- [18] Kristensen E., Hansen T., Delefosse M. et al. Contrasting effects of the polychaetes *Marenzelleria viridis* and *Nereis diversicolor* on benthic metabolism and solute transport in sandy coastal sediment // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2011. T. 425. P. 125—139.
- [19] Lehtoranta J. and Ekholm P., Pitkänen H. Coastal eutrophication threshold: a matter of sediment microbial processes // Ambio. 2009. V. 38, N 6. P. 303—308.
- [20] Meysman F., Middelburg J., and Heip C. Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea // TRENDS in Ecology and Evolution. 2006. V. 21, N 12. P. 688—695.
- [21] Norkko J., Reed D. C., Timmermann K., Norkko A. et al. A welcome can of worms? Hypoxia mitigation by an invasive species // Global Change Biology. 2012. V. 18, N 2. P. 422—434.
- [22] Pitkänen H. Nutrient dynamics and conditions in the eastern Gulf of Finland: the regulatory role of the Neva estuary // Aqua Fennica. 1991. N 21 (2). P. 105—115.
- [23] Renz J. R. and Forster S. Are similar worms different? A comparative tracer study on bioturbation in the three sibling species *Marenzelleria arctica*, *M. viridis*, and *M. neglecta* from the Baltic Sea // Limnology and Oceanography. 2013. V. 58. P. 2046—2058.
- [24] Savchuk O., Eremina T., Isaev A., Neelov I. Response of eutrophication in the eastern Gulf of Finland to nutrient load reduction scenarios // Hydrobiologia. 2009. V. 629. P. 225—237.
- [25] Sundby B., Gobeil C., Silverberg N., Mucci A. The phosphorus cycle in coastal marine sediments // Limnology and Oceanography. 1992. V. 37. P. 1129—1145.