



УДК 551.464.617 (262.81)
DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-2-308-318
EDN MHDPVA

Азот в поровых водах донных отложений Северного Каспия

¹Дегтярева Л.В., ²Попова Н.В., ³Азизов Э.Р.

¹Каспийский морской научно-исследовательский центр
Россия, 414045, г. Астрахань, ул. Ширяева, 14

²Каспийская нефтяная компания
Россия, 414014, г. Астрахань, пр. Губернатора Анатолия Гужвина, 10

³ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть
Россия, 414000, г. Астрахань, ул. Адмиралтейская, 1, к. 2
dlgru@mail.ru, popovanv@caspoil.com, eldar.azizov@lukoil.com

Аннотация. Работа проведена с целью изучения особенностей накопления минерального (аммонийного, нитритного и нитратного) и органического азота в поровых водах донных отложений Северного Каспия при различных окислительно-восстановительных условиях. Установлено, что зоной аккумуляции нитритов и нитратов в поровых водах донных отложений является область со сложившейся в грунтах восстановительной обстановкой, аммонийного и органического азота – в переходных условиях; минерального азота – в окислительных условиях. Статистический анализ показал, что в разных окислительно-восстановительных условиях концентрация минеральных и органической форм азота зависит от различных гидрохимических параметров. Основными факторами являются содержание растворенного органического вещества, Eh придонного слоя воды, pH и Eh поровых вод донных отложений.

Ключевые слова: Северный Каспий, азот, поровые воды донных отложений, окислительно-восстановительный потенциал, водородный показатель

Для цитирования: Дегтярева Л.В., Попова Н.В., Азизов Э.Р. 2025. Азот в поровых водах донных отложений Северного Каспия. Региональные геосистемы, 49(2): 308–318. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-2-308-318 EDN: MHDPVA

Nitrogen in the Pore Waters of the Northern Caspian Bottom Sediments

¹Larisa V. Degtyareva, ²Natalia V. Popova, ³Eldar R. Azizov

¹Caspian Marine Research Center
14 Shiryayev St, Astrakhan 414045, Russia

²Caspian Oil Company
10 Governor Anatoly Gujwin Av, Astrakhan 414014, Russia

³LUKOIL-Nizhnevolzhskneft
1 Admiralteyskaya St, building 2, Astrakhan 414000, Russia
dlgru@mail.ru, popovanv@caspoil.com, eldar.azizov@lukoil.com

Abstract. The paper is focused on the peculiarities of accumulation of mineral nitrogen (ammonium, nitrite and nitrate) and organic nitrogen in pore waters of bottom sediments in the western part of the Northern Caspian under various oxidative-reducing conditions. The bottom sediments of the studied area are represented by shells, sands, and silts. Oxidative conditions developed in the bottom sediments on a larger area of water. The pH values of pore water of bottom sediments were sufficiently uniform. It was found that the share of organic nitrogen in pore water of bottom sediments was larger than that of mineral nitrogen. Among mineral nitrogen types, ammonium nitrogen dominated. An increased degree of bottom sediment oxidation leads to a decrease of organic, ammonium, nitrite and nitrate nitrogen in pore waters.

At the same time, ammonium and organic nitrogen have synchronous dynamics with nutrient content in the bottom layer of water during the transition from reduction to oxidative conditions. The study reveals a significant increase in nitrite nitrogen content in pore waters of the bottom sediments of the Northern Caspian, as compared to the findings obtained in the twentieth century. Reduction reactions in the bottom sediment took place in areas of nitrite and nitrate accumulation in pore waters; while ammonium and organic nitrogen was accumulated in areas with transition conditions; and mineral nitrogen prevailed in oxidative conditions. The statistical analysis shows that in different oxidative-reducing conditions, the concentration of mineral and organic forms of nitrogen depends on various hydrochemical parameters. The main factors are the content of dissolved organic matter, oxidation-reduction potentials of bottom water layer, pH and oxidation-reduction potentials of pore water of bottom sediments

Keywords: oxidative-reducing potential, hydrogen value, ammonium nitrogen, nitrites, nitrates, organic nitrogen

For citation: Degtyareva L.V., Popova N.V., Azizov E.R. 2025. Nitrogen in the Pore Waters of the Northern Caspian Bottom Sediments. *Regional Geosystems*, 49(2): 308–318 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-2-308-318 EDN: MHDPVA

Введение

Азот – важный показатель биопродуктивности экосистемы моря. Азот входит в состав нуклеиновых кислот, хлорофилла, витаминов группы В, участвует в процессе первичного продуцирования органического вещества [Клёцкина, Минкевич, 2013; Катунин, 2014].

В водных экосистемах азот существует в форме аммония (при высокой степени восстановления) или нитратов (при высокой степени окисления) [Секи, 1986]. Нитриты присутствуют в море обычно в очень малых количествах. Их лабильность обусловлена тем, что они являются промежуточным звеном в нитрификации и денитрификации, их образование представляет собой результат двух различных процессов: окисления аммиака и восстановления нитратов. Круговорот азота в море осуществляется в процессах продуцирования и распада органического вещества и в дальнейших окислительно-восстановительных реакциях [Бруевич, 1978].

Основная часть азота поступает в Северный Каспий со стоком р. Волги в растворенном и взвешенном состоянии [Пахомова, Затучная, 1966]. Согласно исследованиям, проведенным на других водных объектах, важным источником азота являются атмосферные осадки [Закутин и др., 1995].

Соединения азота попадают в донные отложения (ДО) в составе органического вещества, адсорбированного на взвешенных веществах [Гаркавая, Богатова, 2007]. Выпавшие на дно минеральные и органические частицы представляют собой суспензию, в которой подавляющую часть составляет жидкая фаза – поровые воды [Бордовский, 1974].

Часть поровых вод включается в состав кристаллической решетки минералов или адсорбируется на поверхности частиц ДО в виде тончайшей пленки. Часть представляет собой мобильную жидкую среду, окружающую частицы ДО, и участвует в обменных процессах на границе раздела «вода – ДО» [Даутвальтер, 2012]. Химический состав поровых вод отличается от химического состава морской воды [Gieskes, 1975; Гаркавая, Богатова, 2007]. Эти различия формируют разнонаправленные потоки на границе раздела «вода – ДО» [Тищенко и др., 2022]. На распределение элементов в системе «вода – ДО» влияет множество факторов: минерализация, сумма активных температур, содержание растворенного в воде придонного слоя кислорода, интенсивность диагенеза, величина потока взвешенного органического вещества, уровень эвтрофирования, деятельность микроорганизмов [Rutgers et al., 1984; Клёцкина, Минкевич, 2013; Косенко, 2019; Тищенко и др., 2022]. Процессы обмена азота в системе «твердая фаза ДО – поровые воды» регулируются в основном окислительно-восстановительными и кислотно-щелочными условиями среды [Романкевич, 1977].

ДО – источник вторичного загрязнения водных масс [Гаркавая, Богатова, 2007; Гурова и др., 2023]. Основными компонентами азотного загрязнения являются аммоний и нитрат [Клёцкина, Минкевич, 2013]. Возрастание содержания восстановленных соединений азота в ДО увеличивает их поток в придонный слой воды, обуславливая субкислородные или анаэробные условия [Meysman et al., 2003]. Кроме того, высокое содержание элементов в ДО препятствует процессам самоочищения воды [Петросян, Пирумян, 2016].

Изучение поровых вод ДО – необходимый элемент в изучении баланса биогенных веществ, особенно в эвтрофных аквасистемах [Гаркавая, Богатова, 2007], где наблюдается изменение климата и усиление антропогенного воздействия [Брезгунов, Ферронский, 2010; Белкина, 2021]. Именно к таким водным объектам относится Северный Каспий [Шипулин, 2021; Островская и др., 2022].

Цель работы состояла в изучении особенностей накопления минерального и органического азота в поровых водах донных отложений Северного Каспия при различных окислительно-восстановительных условиях.

Объекты и методы исследования

Материалами для исследований послужили данные за период 2017–2021 гг., полученные в ходе проведения мониторинговых работ на лицензионных участках ООО «Каспийская нефтяная компания» и ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», расположенных в западной части Северного Каспия.

Сетка станций была разработана с равномерным распределением по акватории точек отбора проб (рис. 1).

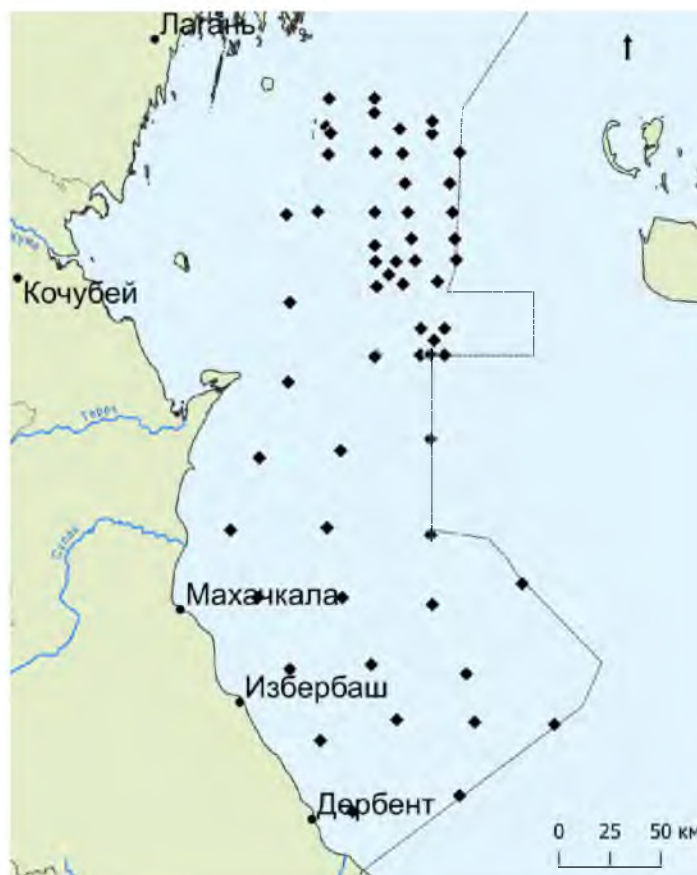


Рис. 1. Схема отбора проб
Fig. 1. Sampling scheme

За исследуемый период пробы морской воды и донных отложений отбирались ежегодно в весенний и осенний периоды на 51 станции. Всего было отобрано 510 проб. Диапазон глубин составил 4,4–27,6 м. Пробы воды были отобраны с помощью батометра Молчанова ГР-18, донных отложений – дночерпателем Петерсена («Океан-50»). При выполнении исследований использовались методики отбора проб, рекомендованные национальным стандартом (ГОСТ 17.1.5.04-81 для отбора морской воды и ГОСТ 17.1.5.01-80 – для отбора донных отложений).

Пробы были обработаны в лаборатории ФГБУ «СевКасптехмордирекция», внесенной в Реестр аккредитованных лабораторий. В поровых водах донных отложений были определены: концентрация аммонийного, нитритного, нитратного и общего азота (ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.30-02, ПНД Ф 16.1:2.2.2:3.51-08, ПНД Ф 16.1:2.2.2:3.67-10, ПНД Ф 14.1:2.206-04 соответственно). Количество органического азота было рассчитано как разница между содержанием общего азота и суммой его минеральных форм. Водородный показатель (рН) и окислительно-восстановительный потенциал (Eh) были определены и в придонном слое морской воды, и в поровых водах донных отложений. Статистический анализ проведен согласно [Смагунова, Карпукова, 2012].

Результаты и их обсуждение

ДО исследуемой акватории были представлены ракушей, песками, илами.

В ДО Северного Каспия величина редокс-потенциала (Eh) изменялась от –228 до +432 мВ. Закономерностей в пространственном распределении Eh не выявлено. На большей площади акватории в донных отложениях складывались окислительные условия. Значение водородного показателя (рН) было в интервале 7,09–8,63. Величины рН морской воды и поровых вод ДО достаточно однородны, но даже небольшие изменения рН имеют влияние на процессы, происходящие в морской среде [РД 52.10.735-2010, 2010]. Зональность в распределении данных параметров была не выражена.

Концентрация общего азота ($N_{\text{общ}}$) в поровых водах ДО была в интервале 17,2–14909,0 мг/л (табл. 1). Доля органического азота ($N_{\text{орг}}$) в несколько раз превышала долю минерального азота ($N_{\text{мин}}$) в восстановительных ($Eh < 0$ мВ) и переходных (Eh от 0 до +100 мВ) условиях. Известно, что восстановительная среда свидетельствует о поступлении органического вещества [Колпакова и др., 2018]. В окислительной обстановке ($Eh > 100$ мВ) превалирование органической формы азота в пуле $N_{\text{общ}}$ незначительно, поскольку в присутствии свободного кислорода минерализация $N_{\text{орг}}$ происходит интенсивнее.

Таблица 1
Table 1

Концентрация азота (мг/л) в поровых водах донных отложений
в различных окислительно-восстановительных условиях (мВ)
Concentration of nitrogen (mg/l) in pore water of bottom sediments
in various oxidative-reducing conditions (mV)

Eh поровых вод ДО	$N_{\text{общ}}$		$N_{\text{мин}}$		$N_{\text{орг}}$	
	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон
< 0	1465,1	187,7–4529,0	424,7	2,8–2792,8	2026,2	58,8–8842,2
0–100	1671,4	21,0–14909,0	237,2	5,6–1031,0	2422,2	3,8–29142,7
> 100	1335,4	17,2–12871,5	628,5	14,0–4722,9	743,5	0,6–8309,1

В составе $N_{\text{мин}}$ преобладал аммонийный азот (NH_4^+) (табл. 2). NH_4^+ – первый продукт распада органического вещества. Накопление аммония происходит в анаэробных



условиях, где невозможен процесс нитрификации [Алекин, 1970]. В восстановительных и переходных условиях зарегистрировано высокое содержание NH_4^+ в поровых водах ДО. В окислительных условиях концентрация NH_4^+ снижается. Установлено, что анионы в окисленном состоянии больше подвижны и накапливаются в восстановительных условиях [Справочник..., 1989]. Снижение NO_2^- и NO_3^- наблюдается в переходных условиях. Известно, что нитриты и нитраты интенсивнее образуются в восстановительных условиях [Гаркавая, Богатова, 2007].

Таблица 2
Table 2

Концентрация минерального азота (мг/л) в поровых водах донных отложений
в различных окислительно-восстановительных условиях (мВ)
Concentration of mineral nitrogen (mg/l) in pore water of bottom sediments
in various oxidative-reducing conditions (mV)

Eh поровых вод ДО	NH_4^+		NO_2^-		NO_3^-	
	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон
< 0	1158,0	13,3–4510,0	45,4	0–1046,1	261,7	4,1–2245,0
0–100	1609,4	0–14905,0	15,3	0–54,1	46,7	1,9–165,0
> 100	565,1	0–4720,0	12,9	0–257,5	50,5	1,7–252,0

Таким образом, возрастание степени окисленности осадка приводит к снижению аммонийной, нитритной и нитратной форм азота в поровых водах ДО. При этом синхронную динамику с содержанием биогенных элементов в придонном слое воды при переходе от восстановительных условий к окислительным имеют NH_4^+ , $N_{\text{мин}}$, $N_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$ (табл. 3). Однако корреляционные связи были выявлены только у NH_4^+ и $N_{\text{мин}}$. Так, между концентрацией NH_4^+ в поровых водах ДО и концентрацией NH_4^+ в придонном горизонте воды значимая корреляционная зависимость установлена только в переходных условиях ($r = +0,41$; $n = 29$; $\alpha = 0,05$) и в окислительной обстановке ($r = +0,35$; $n = 183$; $\alpha = 0,05$). Между содержанием $N_{\text{мин}}$ в поровых водах ДО и содержанием $N_{\text{мин}}$ в придонном слое воды значимая корреляционная зависимость также установлена только в переходных ($r = +0,40$; $n = 29$; $\alpha = 0,05$) и в окислительных ($r = +0,40$; $n = 183$; $\alpha = 0,05$) условиях.

Таблица 3
Table 3

Средние величины концентрации азота (мг/л) в придонном слое воды
в различных окислительно-восстановительных условиях (мВ)
Average values of nitrogen concentration (mg/l) in the bottom water layer
in various oxidative-reducing conditions (mV)

Eh поровых вод ДО	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$N_{\text{мин}}$	$N_{\text{орг}}$	$N_{\text{общ}}$
< 0	40,7	0,8	2,7	44,1	424,7	469,8
0–100	64,4	0,7	2,3	67,4	237,2	304,6
> 100	42,6	1,1	2,2	47,0	393,8	439,1

В придонном слое воды условия изменялись от переходных до окислительных. Отмечено, что при переходе от восстановительных условий к окислительным наблюдается в поровых водах ДО наблюдается снижение редокс-потенциала и pH придонного слоя воды (табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Средние значения окислительно-восстановительного потенциала (мВ)
и водородного показателя в различных окислительно-восстановительных условиях (мВ)
Average values of the oxidation-reduction potential (mV) and the hydrogen index
in various oxidative-reducing conditions (mV)

Eh поровых вод ДО	Eh придонного слоя воды	pH придонного слоя воды	pH поровых вод ДО
< 0	398	8,47	7,90
0–100	383	8,39	8,05
> 100	321	8,35	8,08

pH поровых вод ДО демонстрировал обратную динамику. То есть как в поровых водах ДО, так и в придонном слое воды водородный показатель и окислительно-восстановительный потенциал характеризовались схожей динамикой, что соответствует классическому поведению данных параметров [Страхов, 1983]. Однако изменения в воде и поровых водах ДО были разнонаправленными.

В восстановительной обстановке содержание $N_{орг}$ в поровых водах ДО находилось в обратной зависимости от pH придонного слоя воды ($r = -0,61$; $n = 42$; $\alpha = 0,05$) и pH поровых вод ДО ($r = -0,38$; $n = 42$; $\alpha = 0,05$). В связи $N_{общ}$ – pH придонного слоя воды коэффициент корреляции был равен $-0,51$ ($n = 42$; $\alpha = 0,05$). В связи $N_{общ}$ – pH поровых вод ДО коэффициент корреляции составил $-0,50$ ($n = 42$; $\alpha = 0,05$).

Следовательно, при понижении pH, сопутствующем разложению органического вещества [Химия океана..., 1979], увеличивается поступление $N_{орг}$ из ДО в поровые воды.

В переходных условиях концентрация нитритов зависела от pH поровых вод ДО ($r = -0,58$; $n = 29$; $\alpha = 0,05$); нитратов – от Eh поровых вод ДО ($r = -0,53$; $n = 29$; $\alpha = 0,05$).

Снижение величины Eh, свидетельствующее о формировании анаэробных условий в придонном слое воды, приводит к миграции веществ из ДО в воду [Шигаева и др., 2020].

В окислительной обстановке на содержание биогенных элементов в поровых водах ДО оказывал влияние редокс-потенциал. От Eh придонного слоя воды находилась в зависимости концентрация NH_4^+ ($r = +0,75$), $N_{мин}$ ($r = +0,75$), $N_{орг}$ ($r = +0,67$), $N_{общ}$ ($r = +0,72$). Eh поровых вод ДО оказывал влияние на концентрацию этих биогенов в меньшей степени: NH_4^+ ($r = +0,49$), $N_{мин}$ ($r = +0,50$), $N_{орг}$ ($r = +0,37$), $N_{общ}$ ($r = +0,42$). Для всех вышеперечисленных зависимостей $n = 183$; $\alpha = 0,05$.

В придонном горизонте воды при переходе от восстановительных к окислительным условиям объяснимо возрастает концентрация растворенного в воде кислорода (табл. 5). Наблюдается также увеличение содержания растворенного органического вещества. Повышение данных показателей свидетельствует об интенсификации продукционных процессов [Лобковский и др., 2005]. На этом фоне в окислительной среде резко снижается количество взвешенных веществ и взвешенного органического вещества.

Уровень накопления органического вещества в ДО при переходе от восстановительных к окислительным условиям изменялся незначительно (0,42 и 0,43 % соответственно).

В восстановительной обстановке установлена зависимость содержания NH_4^+ в поровых водах ДО от концентрации растворенного органического вещества в придонном слое воды ($r = +0,45$; $n = 42$; $\alpha = 0,05$).

В переходных условиях концентрация NO_2^- в поровых водах ДО зависела от концентрации взвешенного вещества в придонном слое воды ($r = +0,49$; $n = 29$; $\alpha = 0,05$); $N_{мин}$ и $N_{общ}$ – от уровня накопления органического вещества в ДО ($r = +0,61$ и $r = +0,65$ соответственно; при $n = 29$; $\alpha = 0,05$).



Таблица 5
Table 5

Средние значения гидрохимических показателей (мг/л) в придонном слое воды
в различных окислительно-восстановительных условиях (мВ)
Average values of hydrochemical indicators (mg/l) in the bottom water layer
in various oxidative-reducing conditions (mV)

Eh поровых вод ДО	Кислород	Взвешенные вещества в придонном слое воды	Растворенное органическое вещество в придонном слое воды	Взвешенное органическое вещество в придонном слое воды
< 0	4,54	6,2	2,24	2,14
0–100	5,90	9,8	2,40	3,00
> 100	7,15	2,7	2,96	1,44

В окислительной обстановке выявлена зависимость NH_4^+ в поровых водах ДО от количества взвешенного вещества и взвешенного органического вещества в придонном слое воды ($r = +0,43$ и $r = +0,39$ соответственно; при $n = 183$; $\alpha = 0,05$).

В сезонной динамике наблюдалось снижение концентрации NH_4^+ и $\text{N}_{\text{орг}}$ в поровых водах ДО от весны к осени, в восстановительной обстановке отмечено резкое возрастание содержания NO_2^- и NO_3^- в осенний период (рис. 2). Такая динамика различных форм азота свидетельствует о развитии деструкционных процессов, в результате которых происходит минерализация органического вещества [Алекин, 1970].

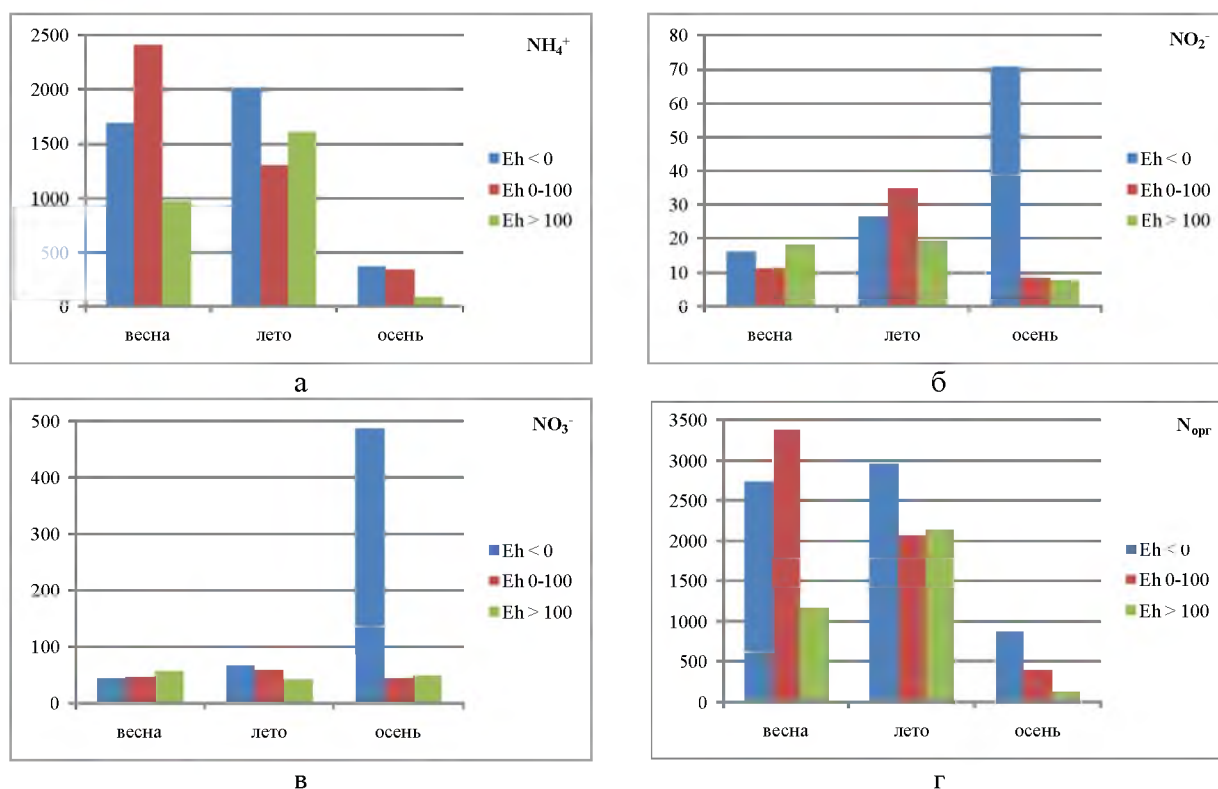


Рис. 2. Сезонная динамика азота (мг/л): а – аммонийного (NH_4^+), б – нитритного (NO_2^-), в – нитратного (NO_3^-), г – органического ($\text{N}_{\text{орг}}$)

Fig. 2. Seasonal dynamics of nitrogen (mg/l): а – ammonium (NH_4^+), б – nitrite (NO_2^-), в – nitrate (NO_3^-), г – organic nitrogen ($\text{N}_{\text{орг}}$)

Следует отметить, что в ранее проведенных исследованиях поровых вод ДО Северного Каспия [Бруевич, 1978], были обнаружены корреляционные связи между различными формами азота и мелкодисперсной фракцией ДО. В результате нашей работы статистически значимой зависимости содержания биогенных элементов в поровых водах ДО от процента пелитовой ($d < 0,01$ мм) и алевритовой ($d = 0,05–0,01$ мм) фракций осадка не выявлено. В более ранних исследованиях концентрация NH_4^+ в поровых водах достигала 16900 мг/л, в современный период максимальная величина NH_4^+ составила 14905 мг/л; содержание NO_2^- было близким к нулю, за период проведенных нами исследований значительно возросло и достигало 1046 мг/л.

Заключение

Таким образом, зоной аккумуляции NO_2^- и NO_3^- в поровых водах ДО является область со сложившейся в ДО восстановительной обстановкой; NH_4^+ и $N_{\text{орг}}$ – с переходными условиями в ДО; $N_{\text{мин}}$ – с окислительными условиями.

Иерархическое ранжирование коэффициентов корреляции показало, что содержание NH_4^+ в поровых водах ДО в наибольшей степени обусловлено концентрацией растворенного органического вещества (в восстановительной обстановке), концентрацией NH_4^+ в придонном слое воды (в переходных условиях) и Eh придонного слоя воды (на участках со сложившейся в ДО окислительной обстановкой). Содержание NO_2^- зависит от pH, а NO_3^- – от Eh поровых вод ДО (в переходных условиях). Концентрация $N_{\text{орг}}$ – от pH поровых вод ДО (в восстановительной обстановке) и Eh придонного слоя воды (в окислительных условиях).

Следовательно, в переходных условиях при преобладании деструкционных процессов (снижение pH) в поровых водах ДО Северного Каспия возрастает концентрация NO_2^- , что может привести к вторичному загрязнению нитритами. В восстановительной обстановке при развитии деструкционных процессов существует угроза вторичного загрязнения органическим азотом.

Список источников

- Алекин О.А. 1970. Основы гидрохимии. Ленинград, Гидрометеорологическое изд-во, 444 с.
РД 52.10.735-2010. 2010. Водородный показатель морских вод. Методика измерений потенциометрическим методом. Москва, ГОИН, 23 с.
Смагунова А.Н., Карпукова О.М. 2012. Методы математической статистики в аналитической химии. Ростов-на-Дону, Феникс, 346 с.
Справочник по гидрохимии. 1989. Ленинград, Гидрометеиздат, 391 с.

Список литературы

- Белкина Н.А. 2021. Закономерности осадконакопления и раннего диагенеза донных отложений в водоемах юго-восточной части фенноскандинавского кристаллического щита. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Санкт-Петербург, 48 с.
Бордовский О.К. 1974. Органическое вещество морских и океанских осадков в стадию раннего диагенеза. Москва, Наука, 104 с.
Брезгунов В.С., Ферронский В.И. 2010. Микро- и макроэлементы в поровых водах глубинных областей Южного и Среднего Каспия. Водные ресурсы, 37(6): 700–708.
Бруевич С.В. 1978. Проблемы химии моря. Москва, Наука, 335 с.
Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И. 2007. Минеральные и органические вещества в поровых растворах донных отложений украинской части взморья Дуная. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, 15: 528–540.
Гурова Ю.С., Якушев Е.В., Березина А.В., Новиков М.О., Гуров К.И., Орехова Н.А. 2023. Численное моделирование динамики окислительно-восстановительных условий на границе



- вода – донные отложения в Севастопольской бухте. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря, 2: 71–90. <https://doi.org/10.29039/2413-5577-2023-2-71-90>
- Даутвальтер В.А. 2012. Геоэкология донных отложений озера. Мурманск, Изд-во МГТУ, 242 с.
- Закутин В.П., Чугунова Н.Н., Фетисенко Д.А., Пантелеева З.Н., Богомоллова А.А. 1995. Аммонийсодержащие подземные воды (условия формирования и распространения). Водные ресурсы, 2(6): 726–737.
- Катунин Д.Н. 2014. Гидроэкологические основы формирования экосистемных процессов в Каспийском море и дельте реки Волги. Астрахань, Изд-во КаспНИРХ, 478 с.
- Клёцкина О.В., Минькевич И.И. 2013. Азотное загрязнение подземных вод и управление их качеством в промышленных районах. Вестник Пермского университета. Геология, 4(21): 8–20.
- Колпакова М.Н., Гаськова О.Л., Наймушина О.С., Кривоногов С.К. 2018. Озеро Эбейты, Россия: химико-органический и минеральный состав воды и донных отложений. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 329(1): 111–123.
- Косенко Ю.В. 2019. Основные аспекты баланса биогенных элементов в Азовском море. Водные биоресурсы и среда обитания, 2(4): 24–37. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_4_24.
- Лобковский Л.И., Левченко Д.Г., Леонов А.В., Амбросимов А.К. 2005. Геоэкологический «портрет» экосистемы Каспийского моря. В кн.: Геоэкологический мониторинг морских нефтегазоносных акваторий. Москва, Наука: 263–298.
- Островская Е.В., Гаврилова Е.В., Варначкин С.А. 2022. Изменения гидролого-гидрохимического режима Северного Каспия в условиях меняющегося климата. В кн.: Изменение климата в регионе Каспийского моря. Материалы Международной научной конференции, Астрахань, 27–28 октября 2021. Астрахань, Издатель Сорокин Роман Васильевич: 75–77.
- Пахомова А.С., Затучная Б.М. 1966. Гидрохимия Каспийского моря. Ленинград, Гидрометеиздат, 343 с.
- Петросян В.А., Пирумян Г.П. 2016. Влияние содержания сульфат и нитрат ионов на миграцию железа в системе вода-донные отложения реки Раздан. Вода: химия и экология, 3(93): 78–84.
- Романкевич Е.А. 1977. Геохимия органического вещества в океане. Москва, Наука, 256 с.
- Секи Х. 1986. Органические вещества в водных экосистемах. Ленинград, Гидрометеиздат, 198 с.
- Страхов Н.М. 1983. Избранные труды. Общие проблемы геологии, литологии и геохимии. Москва, Наука, 640 с.
- Тищенко П.Я., Борисенко Г.В., Барабанщиков Ю.А., Павлова Г.Ю., Рюмина А.А., Сагалаев С.Г., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Уланова О.А., Швецова М.Г., Шкирникова Е.М. 2022. Оценка потоков биогенных веществ на границе раздела вода – дно в мелководных бассейнах залива Петра Великого (Японское море). Геохимия, 67(9): 881–895. <https://doi.org/10.31857/S0016752522090084>.
- Химия океана. Том 1. Химия вод океана. 1979. Москва, Наука, 518 с.
- Шигаева Т.Д., Поляк Ю.М., Кудрявцева В.А. 2020. Окислительно-восстановительный потенциал как показатель состояния объектов окружающей среды. Биосфера, 12(3): 111–124. <https://doi.org/10.24855/BIOSFERA.V12I3.549>.
- Шипулин С.В. 2021. Состояние запасов водных биоресурсов Волжско-Каспийского бассейна и меры по их сохранению в условиях развития нефтедобычи. В кн.: Проблемы сохранения экосистемы Каспия в условиях освоения нефтегазовых месторождений. Материалы VIII научно-практической конференции с международным участием, Астрахань, 22 октября 2021. Астрахань, Волжско-Каспийский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ»): 306–309.
- Gieskes J.M. 1975. Chemistry of Interstitial Waters of Marine Sediments. Annual Review Earth Planetary Sciences, 3: 433–453. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.03.050175.002245>
- Meysman F.J.R., Middelburg J.J., Herman P.M.J., Heip C.H.R. 2003. Reactive Transport in Surface Sediments. II. Media: An Object-Oriented Problem-Solving Environment for Early Diagenesis. Computers and Geosciences, 29(3): 301–318. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00007-4)
- Rutgers van Loeff M.M., Anderson L.G., Hall P.O.J., Inerfeldt, Josefson A.B., Sundby B., Westerlund S.F.G. 1984. The Asphyxiation Technique: an Approach to Distinguish Between Molecular Diffusion and Biologically Mediated Transport at the Sediment-Water Interface. Limnology and Oceanography, 29(4): 675–686. <https://doi.org/10.4319/lo.1984.29.4.0675>

References

- Belkina N.A. 2021. Zakonomernosti osadkonakoplenija i rannego diagenеза donnyh otlozhenij v vodoemah jugo-vostochnoj chasti fennoskandinavskogo kristallicheskogo shhita [Patterns of Sediment Accumulation and Early Diagenesis of Bottom Sediments in the Waters of the South-Eastern Part of the Fennoscandinavian Crystal Shield]. Abstract dis. ... dokt. geogr. sciences. St. Petersburg, 48 p.
- Bordovskij O.K. 1974. Organicheskoe veshhestvo morskikh i okeanskikh osadkov v stadiju rannego diagenеза [Organic Matter of Marine and Ocean Sediments in the Early Diagenesis Stage]. Moscow, Publ. Nauka, 104 p.
- Brezgunov V.S., Ferronsky V.I. 2010. Macro- and Microelements in the Interstitial Water of Deep-Water Areas of the Southern and Middle Caspian Sea. Water resources, 37(6): 825–833 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0097807810060084>
- Bruevich S.V. 1978. Problemy himii morja [Problems of Sea Chemistry]. Moscow, Publ. Nauka, 335 p.
- Garkavaja G.P., Bogatova Ju.I. 2007. Mineral'nye i organicheskie veshhestva v porovyh rastvorah donnyh otlozhenij ukrainskoj chasti vzmor'ja Dunaja [Mineral and Organic Substances in Pore Solutions of Bottom Sediments of the Ukrainian Part of the Danube]. Jekologicheskaja bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa, 15: 528–540.
- Gurova Yu.S., Yakushev E.V., Berezina A.V., Novikov M.O., Gurov K.I., Orekhova N.A. 2023. Numerical Modelling of Redox Condition Dynamics at the Water-Sediment Interface in Sevastopol Bay. Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea, 2: 71–90 (in Russian). <https://doi.org/10.29039/2413-5577-2023-2-71-90>
- Dautval'ter V.A. 2012. Geojekologija donnyh otlozhenij ozer [Geoecology of Bottom Sediments of Lakes]. Murmansk, Publ. MGTU, 242 p.
- Zakutin V.P., Chugunova N.N., Fetisenko D.A., Panteleeva Z.N., Bogomolova A.A. 1995. Ammonijsoderzhashhie podzemnye vody (uslovija formirovanija i rasprostranenija) [Ammonium-Containing Groundwater (Conditions of Formation and Distribution)]. Water resources, 2(6): 726–737.
- Katunin D.N. 2014. Hydroecological Grounds of Formation of Ecosystem Processes in the Caspian Sea and the Volga River Delta. Astrakhan, Publ. KaspNIRH, 478 p. (in Russian).
- Kletskina O.W., Minkevich I.I. 2013. Nitrogen Pollution of the Underground Waters and Management of Their Quality in Industrial Areas. Bulletin of Perm University. Geology, 4(21): 8–20 (in Russian).
- Kolpakova M.N., Gaskova O.L., Naymushina O.S., Krivonogov S.K. 2018. Ebeity Lake, Russia: Chemical-Organic and Mineral Composition of Water and Bottom Sediments. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 329(1): 111–123 (in Russian).
- Kosenko Yu.V. 2019. Basic Aspects of the Biogenic Elements Balance in the Azov Sea. Aquatic Bioresources & Environment, 2(4): 24–37 (in Russian). https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_4_24
- Lobkovskij L.I., Levchenko D.G., Leonov A.V., Ambrosimov A.K. 2005. Geojekologicheskij «portret» jekosistemy Kaspijskogo morja [Geo-Ecological «Portrait» of the Caspian Sea Ecosystem]. In: Geojekologicheskij monitoring morskikh neftegazonosnyh akvatorij [Geoecological Monitoring of Marine Oil and Gas Bearing Waters]. Moscow, Publ. Nauka: 263–298.
- Ostrovskaja E.V., Gavrilova E.V., Varnachkin S.A. 2022. Izmenenija gidrologo-gidrohimičeskogo rezhima Severnogo Kaspija v uslovijah menjajushhegosja klimata [Changes in the Hydrochemical Regime of the Northern Caspian Under Changing Climate Conditions]. In: Izmenenie klimata v regione Kaspijskogo morja [Climate Change in the Caspian Sea Region]. Proceedings of the International Scientific Conference, Astrakhan, 27–28 October 2021. Astrakhan, Publ. Sorokin Roman Vasil'evich: 75–77.
- Pahomova A.S., Zatuchnaya B.M. 1966. Gidrohimiya Kaspijskogo morja [Hydrochemistry of the Caspian Sea]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 343 p.
- Petrosyan V.A., Pirumyan G.P. 2016. Impact of the Sulphate and Nitrate Ions on the Migration of Iron in the Water-Sediment System of the Hrazdan River. Voda: himija i jekologija, 3(93): 78–84 (in Russian).
- Romankevich E.A. 1977. Geohimiya organicheskogo veshhestva v okeane [Organic Matter Geochemistry in the Ocean]. Moscow, Publ. Nauka, 256 p.



- Seki H. 1986. Organicheskie veshchestva v vodnyh jekosistemah [Organic Matter in Aquatic Ecosystems]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 198 p.
- Strahov N.M. 1983. Izbrannye trudy. Obshhie problemy geologii, litologii i geohimii [Selected Works. General Problems of Geology, Lithology and Geochemistry]. Moscow, Publ. Nauka, 640 p.
- Tishhenko P.Ya., Borisenko G.V., Barabanshnikov Yu.A., Pavlova G.Yu., Ryumina A.A., Sagalaev S.G., Semkin P.Yu., Tishhenko P.P., Ulanova O.A., Shvecova M.G., Shkimikova E.M. 2022. Estimation of Nutrient Fluxes on the Interface Bottom Water–Sediments in Shallow Bights of the Peter the Great Bay, Sea of Japan. *Geochemistry International*, 60(9): 891–904. <https://doi.org/10.1134/S0016702922090087>.
- Himija okeana. Tom 1. Himija vod okeana [Ocean Chemistry. Volume 1. Ocean Chemistry]. 1979. Moscow, Publ. Nauka, 518 p.
- Shigaeva T.D., Polyak Yu.M., Kudryavtseva V.A. 2020. The Redox Potential as an Index of the State of Environmental Entities. *Biosfera*, 12(3): 111–124 (in Russian). <https://doi.org/10.24855/BIOSFERA.V12I3.549>.
- Shipulin S.V. 2021. Sostojanie zapasov vodnyh bioresursov Volzhsko-Kaspijskogo bassejna i mery po ih sohraneniu v usloviyah razvitija neftedobychi [Status of Water Resources of the Volga-Caspian Basin and Measures to Preserve them in the Context of Oil Production]. In: *Problemy sohraneniya jekosistemy Kaspija v usloviyah osvoeniya neftegazovyh mestorozhdenij* [Problems of Preserving the Caspian Ecosystem in the Context of Oil and Gas Field Development]. Proceedings of the VIII scientific and practical conference with international participation, Astrakhan, 22 October 2021. Astrakhan, Publ. Volzhsko-Kaspijskij filial FGBNU «VNIRO» («KaspNIRH»): 306–309.
- Gieskes J.M. 1975. Chemistry of Interstitial Waters of Marine Sediments. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, 3: 433–453. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.03.050175.002245>
- Meysman F.J.R., Middelburg J.J., Herman P.M.J., Heip C.H.R. 2003. Reactive Transport in Surface Sediments. II. Media: An Object-Oriented Problem-Solving Environment for Early Diagenesis. *Computers and Geosciences*, 29(3): 301–318. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00007-4)
- Rutgers van Loeff M.M., Anderson L.G., Hall P.O.J., Inerfeldt, Josefson A.B., Sundby B., Westerlund S.F.G. 1984. The Asphyxiation Technique: an Approach to Distinguish Between Molecular Diffusion and Biologically Mediated Transport at the Sediment-Water Interface. *Limnology and Oceanography*, 29(4): 675–686. <https://doi.org/10.4319/lo.1984.29.4.0675>

Поступила в редакцию 09.02.2025;

поступила после рецензирования 04.03.2025;

принята к публикации 20.03.2025

Received February 09, 2025;

Revised March 04, 2025;

Accepted March 20, 2025

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дегтярева Лариса Вячеславна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Каспийский морской научно-исследовательский центр, г. Астрахань, Россия

Попова Наталья Викторовна, кандидат биологических наук, начальник отдела экологической и промышленной безопасности, Каспийская нефтяная компания, г. Астрахань, Россия

Азизов Эльдар Рамазанович, инженер по охране окружающей среды (эколог) I категории, ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть, г. Астрахань, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Larisa V. Degtyareva, Candidate of Biological Sciences, Leading researcher, Caspian Marine Research Center, Astrakhan, Russia

Natalia V. Popova, Candidate of Biological Sciences, Head of Environmental and Industrial Safety Department, Caspian Oil Company, Astrakhan, Russia

Eldar R. Azizov, Environmental engineer (ecologist) I category, LUKOIL-Nizhnevolzhskneft, Astrakhan, Russia