

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.80>**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМ СЕРЫ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ТРЕХ МАЛЫХ ГИДРОГРАФИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ПРЭСНОВОДНЫХ ОЗЕРАХ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Научная статья

**Титова К.В.<sup>1\*</sup>, Кокрятская Н.М.<sup>2</sup>, Жибарева Т.А.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-7664-7706;<sup>2</sup>ORCID : 0000-0002-0619-7241;<sup>3</sup>ORCID : 0000-0003-3642-3155;<sup>1,2,3</sup> Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (ksyu\_sev[at]mail.ru)

**Аннотация**

Проведены исследования трех пресноводных гидрографически связанных озер юга Архангельской области (Глубокое, Белое, Назаровское). Все озера относились к категории неглубоких (максимальная глубина не превышала 5,5 м). Объектом изучения были донные отложения этих водоемов, отобранные на глубоководных участках с помощью гравитационной трубки в марте в течение двух лет. В образцах по апробированным методикам определены влажность, содержание органического углерода, соединений серы. Отобранные пробы представляли собой илистые осадки. Наибольшие концентрации органического углерода в них зафиксированы в оз. Белое. По соотношению C/N в отложениях вклад аллохтонной части органического вещества снижался в системе от оз. Глубокое к оз. Назаровское. Содержание сульфатной серы увеличивалось в направлении оз. Глубокое – оз. Назаровское – оз. Белое, причем этот показатель в толще отложений по сравнению с поверхностными горизонтами либо снижался незначительно, либо возрастал. В среднем в осадках содержание восстановленных форм серы находилось во взаимосвязи с количеством сульфатной серы и органического вещества: в оз. Глубокое – 0,39% (в расчете на сухое вещество осадков); в оз. Назаровское – 1,57%; оз. Белое – 2,56%. Отличительной особенностью этих водоемов являлось увеличение соединений восстановленной серы в нижних горизонтах отложений, в которых возрастал вклад пиритной серы. Увеличение содержания сульфатной и пиритной серы в нижних слоях донных отложениях, скорее всего, связано с разгрузкой сульфатных вод. В результате чего сульфатредукция и накопление соединений восстановленной серы в донных отложениях осуществляется в каждом из исследованных озер со своей спецификой.

**Ключевые слова:** пресноводные малые озера, донные отложения, соединения серы, углерода.**SPECIFICS OF DISTRIBUTION OF SULPHUR FORMS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THREE SMALL HYDROGRAPHICALLY CONNECTED FRESHWATER LAKES (ARKHANGELSK OBLAST)**

Research article

**Titova K.V.<sup>1\*</sup>, Kokryatskaya N.M.<sup>2</sup>, Zhibareva T.A.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-7664-7706;<sup>2</sup>ORCID : 0000-0002-0619-7241;<sup>3</sup>ORCID : 0000-0003-3642-3155;<sup>1,2,3</sup> N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of RAS, Arkhangelsk, Russian Federation

\* Corresponding author (ksyu\_sev[at]mail.ru)

**Abstract**

Three freshwater hydrographically connected lakes in the south of Arkhangelsk Oblast (Glubokoye, Beloye, Nazarovskoye) were studied. All lakes were classified as shallow (maximum depth did not exceed 5,5 m). The object of study was bottom sediments of these reservoirs, sampled in deep water areas using a gravity tube in March for two years. Moisture, organic carbon content, and sulphur compounds were determined in the samples using approved methods. The selected samples were muddy sediments. The highest concentrations of organic carbon in them were recorded in Lake Beloe. According to the C/N ratio in sediments, the contribution of allochthonous part of organic matter decreased in the system from Lake Glubokoe to Lake Nazarovskoe. The sulphate sulphur content increased in the direction of Lake Glubokoe – Lake Nazarovskoe – Lake Beloe, and this indicator either decreased slightly or increased in the sediment column compared to the surface horizons. On average, the content of reduced sulphur forms in sediments was in correlation with the amount of sulphate sulphur and organic matter: in Lake Glubokoe – 0.39% (per dry matter of sediments); in Lake Nazarovskoye – 1,57%; in Lake Beloe – 2,56%. A distinctive feature of these reservoirs was the increase of reduced sulphur compounds in the lower horizons of sediments, in which the contribution of pyritic sulphur increased. The increase of sulphate and pyrite sulphur content in the lower layers of bottom sediments is most likely related to the discharge of sulphate waters. As a result, sulphate reduction and accumulation of reduced sulphur compounds in bottom sediments is carried out in each of the studied lakes with its own specificity.

**Keywords:** freshwater small lakes, bottom sediments, sulphur, carbon compounds.**Введение**

Круговорот серы как в пространстве, так и во времени, сильно влияет на многие биогеохимические процессы [1], а следовательно, и на внутриводоемные изменения, даже при низких концентрациях сульфатов в пресных озерах. Обнаружение сероводорода в придонных слоях водоема обычно показывает наличие значительного количества органического вещества (ОВ), служит отражением дефицита кислорода [2]. Образование сероводорода, за исключением процессов гниения, является результатом протекания восстановления сульфатов, в основе которого лежит окислительно-восстановительная реакция окисления органических веществ в анаэробных условиях сульфатредуцирующих бактерий за счет сопряженного восстановления сульфатов [3]. Изучение данного процесса в донных отложениях (ДО) возможно по распределению соединений восстановленной серы, выступающих в роли производных соединений образующегося сероводорода. К этим формам серы относят серу кислоторастворимых сульфидов (S<sub>2</sub>-), элементарную серу (S<sub>0</sub>), пиритную серу (S<sub>пир</sub>) и органическую серу (S<sub>орг</sub>) [3]. В ходе ранее проведенных исследований на оз. Белое (среднем из цепи предполагаемых к рассмотрению в данной работе) сульфатредукция протекает с наибольшим накоплением соединений восстановленной серы как в воде, так и в донных отложениях (почти в 10 раз большим, чем для других изученных авторами водоемов изучаемого региона). В толще ДО соединений восстановленной серы обнаружено в 4–5 раз больше, чем в верхних слоях [4], [5].

Целью настоящей работы являлось изучение процесса сульфатредукции в донных отложениях в зимний период еще двух озер системы – Назаровское и Глубокое и сравнение полученных результатов для трех водоемов.

### Методы и принципы исследования

Коношский район расположен в юго-западной части Архангельской области, в подзоне средней тайги. Район характеризуется избыточным увлажнением. Подстилающие породы на данной территории представлены карбонатными породами, в частности, известняками.

Территория района из-за особенностей рельефа является водоразделом трех больших рек – Северной Двины, Онеги и Кубены. Исследуемая группа озер относится к водосборному бассейну р. Онега (верхнему ее течению), бассейн Белого моря. Водоемы изучаемой группы относятся к мелководным (максимальная глубина озер и на станции отбора ДО: оз. Глубокое – 5,5 м; оз. Белое – 2,9 м; оз. Назаровское – 5,0 м) по площади водного зеркала к категории малых, для них характерна вытянутая форма.

Подземные воды на данной территории в основном представлены водами гидрокарбонатного типа кальциевой группы [6]. Однако в ряде случаев для изучаемого района отмечено наличие среди водовмещающих пород гипсов, доломитов, ангидритов. С проникновением подземных вод с повышенным содержанием сульфатов в грунты оз. Белое авторы связывали выявленные особенности протекания сульфатредукции в этом водоеме [4].

Система трех озер расположена на нескольких километрах от дер. Климовская. Водоемы связаны между собой неглубокими ручьями, течение по которым направлено от оз. Глубокое через оз. Белое в оз. Назаровское, далее в р. Нива. В настоящее время на берегах оз. Белое и Глубокое нет жилых строений, на берегу оз. Назаровское расположена дер. Назаровская с очень малым количеством жителей.

Образцы отложений были получены при проведении экспедиций в марте на озерах Глубокое, Белое и Назаровское Коношского района на самых глубоководных участках водоемов (рис.1).



Рисунок 1 - Схема расположения объектов исследования  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.80.1>

Образцы донных осадков отобраны в соответствии с требованиями ГОСТ 17.1.5.01-80 с помощью ударной грунтовой трубки с дискретностью 5 см. Определение содержания форм серы в донных отложениях проводилось по методике [3], предусматривающей определение сульфидной, элементной, пиритной и органической форм серы из одной навески. Серу кислоторастворимых сульфидов определяли, обрабатывая навеску донных отложений натуральной влажности разбавленной соляной кислотой с нагреванием до кипения и одновременной отдувкой аргоном выделяющегося сероводорода в поглотитель. В зависимости от количества образующегося сероводорода определение его концентрации йодометрическое или фотометрическое. В оставшемся фильтрате осаждали сульфаты в виде  $BaSO_4$  и после прокаливания при 800-850°C определяли гравиметрически. Слегка подсушенный при комнатной температуре после промывки осадок экстрагировали ацетоном в аппарате Сокслета. Для определения элементной серы аликвотную часть экстракта обрабатывали раствором  $CrCl_2$ , отгоняя аргоном выделяющийся в результате реакции сероводород. Концентрацию последнего определяли фотометрически. В осадке после экстракции определяли пиритную серу после восстановления ее раствором  $CrCl_2$  до  $H_2S$ , количество которого определяли методом объемного йодометрического титрования. Оставшийся после определения пиритной серы осадок отмывали от ионов хрома, подвергали исчерпывающему окислению, переводя органическую серу в сульфат, количество которого определяли гравиметрически. Количество органического вещества (углерода и азота) устанавливали на CHN-анализаторе.

### Основные результаты

Донные отложения трех исследованных озер были илистыми осадками черного или темно-коричневого цвета с влажностью от 63 до 99%. Минимальное содержание влаги отмечено для ДО оз. Глубокое. Данный водоем также отличался среди озер группы наименьшим количеством органического вещества в расчете на органический углерод ( $C_{орг}$ ) (в среднем 10,07%), а наибольшее – выявлено в осадках оз. Белое (23,27%) (табл.1). Полученные результаты свидетельствуют о значительном содержании органического вещества в оз. Белое и Назаровское на уровне концентраций в отложениях озер Виктория (Африка), Воже и Лача (Россия) [7], [8], и значительно выше, чем в осадках Черного моря [3]. В распределении органического углерода только для оз. Белое отмечена тенденция к уменьшению содержания от поверхности в толщу отложений, для двух остальных – в целом концентрация снижалась, но не равномерно по горизонтам.

Таблица 1 - Некоторые данные отобранных донных отложений

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.80.2>

озеро	год отбора	мощность керна ДО, см	влажность, %	$C_{орг}$ , %
Глубокое	2009	47	69-96	7,79-10,52
	2010	40	63-95	8,35-15,16
Белое	2009	23	82-99	12,28-19,60
	2010	49	82-93	8,11-23,27
Назаровское	2009	37	83-91	13,98-20,31
	2010	44	79-93	11,47-19,40

Соотношение C/N в отложениях изученных озер так же отличалось. При общей тенденции к его увеличению в толще отложений, в среднем этот показатель составлял для оз. Глубокое – 17; оз. Белое – 13; оз. Назаровское – 9.

Среднее содержание и пределы изменения концентраций сульфатов в ДО отражает следующую тенденцию: оз. Глубокое (0,09 (0,01–0,76%)) < оз. Назаровское (0,59 (0,02–2,03%)) < оз. Белое (2,71 (0,50–7,00%)) (рис.2). Для оз. Белое и Глубокое наибольшие количества сульфатов обнаружены в 2009 году, а для оз. Назаровское в 2010 году. В толще отложений всех озер сульфатов обнаруживалось в еще заметных количествах (изменение содержания на поверхности и в толще ДО), %: Глубокое (0,75 → 0,19; 0,05 → 0,10); Белое (7,00 → 0,65; 1,68 → 1,51); Назаровское (0,75 → 0,43; 0,02 → 0,51). Среднее содержание соединений восстановленной серы в ДО оз. Глубокое составляло 0,39 (0,11 – 1,66)%, оз. Белое – 2,56 (0,31 – 11,71)%, оз. Назаровское – 1,57 (0,14 – 3,15)%. Наибольшие ее количества определены в ДО, отобранных в 2009 г. (рис.2).

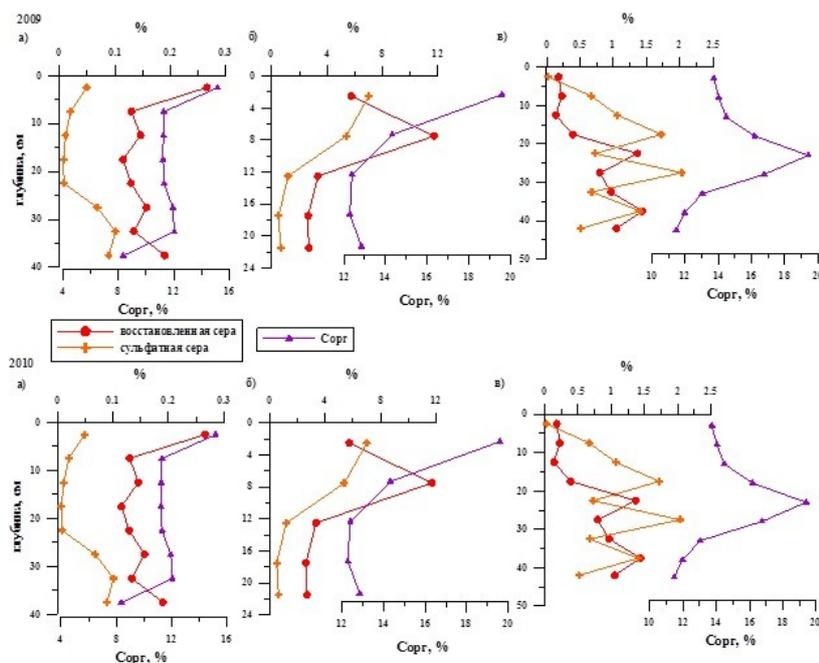


Рисунок 2 - Распределение параметров в донных отложениях озер:

а - Глубокое; б - Белое; в - Назаровское

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.80.3>

Среднее содержание соединений восстановленной серы в ДО оз. Глубокое составляло 0,39 (0,11 – 1,66)%, оз. Белое – 2,56 (0,31 – 11,71)%, оз. Назаровское – 1,57 (0,14 – 3,15)%. Наибольшие ее количества определены в ДО, отобранных в 2009 году (рис.2).

Для оз. Глубокое преобладала в оба года исследований органическая составляющая в среднем 83%, достигая 92% (рис.3). В оз. Белом наблюдалась в верхних горизонтах отложений в наибольшем количестве органическая составляющая до 94%. В толще отложений распределение форм изменялось – на лидирующую позицию выходила уже пиритная сера, вклад которой был до 81% от всех форм восстановленной серы. В отложениях оз. Назаровское наблюдалась значительная межгодовая изменчивость в распределении форм серы: в первый год – органической серы было заметно больше в среднем 80%, во второй год – определена схожая с осадками оз. Белое тенденция к снижению этой составляющей по мере погружения в толщу отложений, где на глубине увеличивалась до 68% доля пиритной серы.

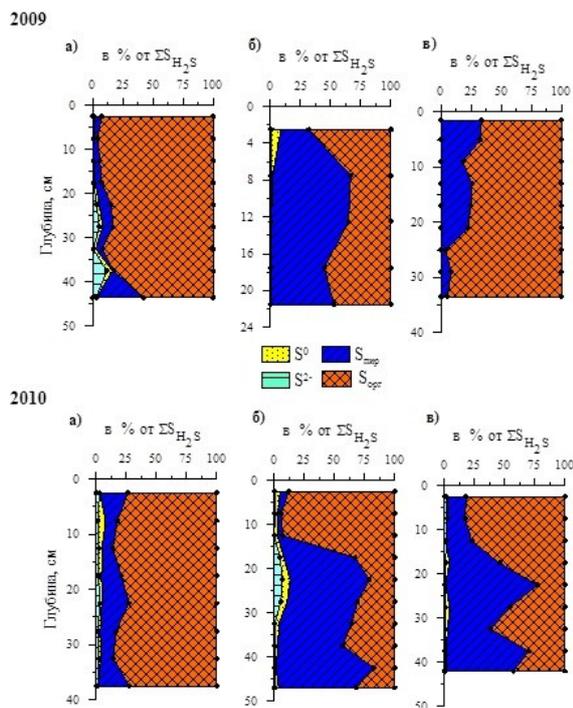


Рисунок 3 - Распределение форм серы в донных отложениях озер:  
 а - Глубокое; б - Белое; в - Назаровское  
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.80.4>

В абсолютных значениях количества пиритной серы в отложениях оз. Глубокое в среднем насчитывали 0,06% (от 0 до 0,65%), в оз. Белое – 0,93% (от 0,02 до 7,60%), в оз. Назаровское – 0,41% (от 0,03 до 1,04%). О значимых количествах пиритной серы может свидетельствовать сравнение со значениями для этой формы серы в донных отложениях Черного моря, в которых оно достигало 2,62% [3]. Основной процесс образования пирита – взаимодействие образующегося сероводорода с соединениями Fe(II) в микроаэрофильных условиях [3]. При отсутствии восстановления сульфатов, сульфид в основном появляется в среде из-за минерализации восстановленной органической серы [3], [9], [10].

### Заключение

Исследования системы озер Глубокое-Белое-Назаровское в течение двух лет в период зимней межени показали межгодовые различия в содержании органического вещества и соединений серы в донных осадках этих водоемов.

Не обнаружено корреляционной зависимости между изменением содержания ОВ и накоплением соединений восстановленной серы.

Влияние же на протекание сульфатредукции в отложениях изученных озер оказало содержание сульфатов.

Минимальное содержание органического вещества, сульфатов и соединений восстановленной серы отмечено в ДО оз. Глубокое. В них восстановленная сера была представлена в основном органической составляющей, что свидетельствует о небольшой активности протекания процесса сульфатредукции.

Наибольшее значение всех определяемых показателей обнаружено в осадках самого мелководного озера системы – оз. Белое. В толще донных отложений этого водоема отмечено заметное увеличение содержания сульфатов, что в анаэробных условиях приводило к активизации их восстановления и накопления значительных количеств восстановленной серы. Среди форм восстановленной серы уже доминировала пиритная сера.

Озеро Назаровское, хотя оно замыкающее в системе, занимало промежуточное положение. В осадках этого водоема накапливалось чуть меньшее количество серы и углерода по сравнению с оз. Белое. Но в толще осадков так же отмечалась более активное протекание восстановления сульфатов.

Увеличение содержания сульфатной и пиритной серы в нижних слоях донных отложениях в той или иной степени во всех изученных озерах, возможно, связано с разгрузкой сульфатсодержащих вод. Это сказалось на специфике накопления соединений восстановленной серы в донных осадках озер Глубокое-Белое-Назаровское.

**Финансирование**

Работа выполнена на основании госзадания за счет средств Минобрнауки РФ.

**Благодарности**

Авторы выражают благодарность Ивахновой Р.Б. за помощь в анализе органического углерода в донных отложениях.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Funding**

The work was carried out on the basis of the state task at the expense of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

**Acknowledgement**

The authors express their gratitude to Ivakhnova R.B. for her help in analysing organic carbon in bottom sediments.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Jørgensen B.B. The Biogeochemical sulfur cycle of marine sediments / B.B. Jørgensen, A.J. Findlay, A. Pellerin // *Frontiers in Microbiology*. — 2019. — Vol.10. — Art. 849. — P. 27. — DOI: 10.3389/fmicb.2019.00849.
2. РД 52.24.450–2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N'-диметил-п-фенилендиамином. — Введ. 2010-06-10. — Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2010. — 50 с.
3. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана / И.И. Волков. — Москва: Наука, 1984. — 272 с.
4. Титова К.В. Процесс сульфатредукции в пресноводных озерах (Белое, Нижнее, Святое) Коношского района Архангельской области / К.В. Титова, Н.М. Кокрятская, Т.А. Жибарева // *Вестник МГОУ. Естественные науки*. — 2017. — № 4. — С. 123–134.
5. Титова К.В. Сульфатредукция в донных отложениях озера Белое (Архангельская область) / К.В. Титова, Н.М. Кокрятская, Т.А. Жибарева // *Материалы XXII международной научной конференции (Школы) по морской геологии «Геология морей и океанов», 20-24 ноября 2017 г., г. Москва*. — Москва: Геос, 2017. — С. 210–214.
6. Подземные воды СССР. Обзор подземных вод Архангельской области. Том I. Гидрогеологический очерк. — Москва, 1968. — 421 с.
7. Mwamburi J. Lake Sedimentary Environments and Roles of Accumulating Organic Matter in Biogeochemical Cycling Processes and Contaminants Loading Are Invasions of Water Hyacinth in Lake Victoria from 1989 a Concern? / J. Mwamburi // *Persistent Organic Pollutants*. — 2019. — Ch. 4. — P. 31–69. — DOI: 10.5772/intechopen.79395.
8. Сигарева Л.Е. Растительные пигменты и органическое вещество в донных отложениях крупных мелководных озер Северо-Запада России / Л.Е. Сигарева, Н.А. Тимофеева, В.В. Законнов // *Геохимия*. — 2022. — Т. 67. — № 12. — С. 1285–1296. — DOI: 10.31857/S0016752522100089.
9. Wei Ch. A new pathway for pyrite formation in low-sulfate sediments driven by mineralization of reduced organic sulfur / Ch. Wei, Sh. Yin, A. Kappler [et al.] // *Fundamental Research*. — 2023. — № 1. — P. 7. — DOI: 10.1016/j.fmre.2023.08.003.
10. Holmer M. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review / M. Holmer, P. Storkholm // *Freshwater Biology*. — 2001. — Vol. 46. — Iss. 4. — P. 431–451.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Jørgensen B.B. The Biogeochemical sulfur cycle of marine sediments / B.B. Jørgensen, A.J. Findlay, A. Pellerin // *Frontiers in Microbiology*. — 2019. — Vol.10. — Art. 849. — P. 27. — DOI: 10.3389/fmicb.2019.00849.
2. RD 52.24.450–2010. Massovaja kontsentratsija serovodoroda i sul'fidov v vodah. Metodika vypolnenija izmerenij fotometricheskim metodom s N,N'-dimetil-n-fenilendiaminom [RD 52.24.450–2010. Mass concentration of hydrogen sulfide and sulfides in waters. Methodology for performing measurements by the photometric method with N,N'-dimethyl-n-phenylenediamine]. — Introduced 2010-06-10. — Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2010. — 50 p. [in Russian]
3. Volkov I.I. Geohimija sery v osadkah okeana [Geochemistry of Sulfur in Ocean Sediments] / I.I. Volkov. — Moscow: Nauka, 1984. — 272 p. [in Russian]
4. Titova K.V. Protsess sul'fatreduksii v presnovodnyh ozerah (Beloe, Nizhnee, Svjatoe) Konoshskogo rajona Arhangel'skoj oblasti [The process of sulfate reduction in freshwater lakes (Beloe, Nizhnee, Svjatoe) of the Konoshsky district of the Arkhangelsk region] / K.V. Titova, N.M. Kokrjatskaja, T.A. Zhibareva // *Bulletin of MGOU. Natural Sciences*. — 2017. — № 4. — P. 123–134. [in Russian]
5. Titova K.V. Sul'fatreduksija v donnyh otlozhenijah ozera Beloe (Arhangel'skaja oblast') [Sulfate reduction in bottom sediments of Lake Beloye (Arkhangelsk region)] / K.V. Titova, N.M. Kokrjatskaja, T.A. Zhibareva // *Proceedings of the XXII International Scientific Conference (School) on Marine Geology "Geology of the Seas and Oceans", November 20-24, 2017, Moscow*. — Moscow: Geos, 2017. — P. 210–214. [in Russian]
6. Podzemnye vody SSSR. Obzor podzemnyh vod Arhangel'skoj oblasti. Tom I. Gidrogeologicheskij ocherk [Groundwater of the USSR. Survey of groundwater of the Arkhangelsk region. Volume I. Hydrogeological essay]. — Moscow, 1968. — 421 p. [in Russian]

7. Mwamburi J. Lake Sedimentary Environments and Roles of Accumulating Organic Matter in Biogeochemical Cycling Processes and Contaminants Loading Are Invasions of Water Hyacinth in Lake Victoria from 1989 a Concern? / J. Mwamburi // *Persistent Organic Pollutants*. — 2019. — Ch. 4. — P. 31–69. — DOI: 10.5772/intechopen.79395.
8. Sigareva L.E. Rastitel'nye pigmenty i organicheskoe veschestvo v donnyh otlozheniyah krupnyh melkovodnyh ozer Severo-Zapada Rossii [Plant pigments and organic matter in bottom sediments of large shallow lakes of North-West Russia] / L.E. Sigareva, N.A. Timofeeva, V.V. Zakonov // *Geochemistry*. — 2022. — Vol. 67. — № 12. — P. 1285–1296. — DOI: 10.31857/S0016752522100089. [in Russian]
9. Wei Ch. A new pathway for pyrite formation in low-sulfate sediments driven by mineralization of reduced organic sulfur / Ch. Wei, Sh. Yin, A. Kappler [et al.] // *Fundamental Research*. — 2023. — № 1. — P. 7. — DOI: 10.1016/j.fmre.2023.08.003.
10. Holmer M. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review / M. Holmer, P. Storkholm // *Freshwater Biology*. — 2001. — Vol. 46. — Iss. 4. — P. 431–451.