

5. Наугольных С.В. Flora Permica. Растительный мир пермского периода: Приуралье // Тр. Геологич. ин-та. – 2016. – Вып. 612. – С. 1-336.
6. Долгих Л.А. История формирования и современное состояние палеонтологической коллекции Кунгурского историко-архитектурного и художественного музея-заповедника // Эволюция органического мира в палеозое и мезозое: в коллекциях и экспозициях естественно-исторических музеев: сб. науч. тр. – СПб, 2011. – С. 54-57.
7. Наугольных С.В. Флора местонахождения Чекарда // Пономарева Г.Ю. Чекарда – местонахождение пермских ископаемых растений и насекомых / ПГУ. – Пермь, 1998. – С. 55-91.
8. Наугольных С.В. Разрез Чекарда // Геологические памятники Пермского края: энцикл. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2009. – С. 178-184.
9. Наугольных С.В. Мазуевское местонахождение нижнепермских ископаемых растений как один из памятников природы Пермского края // Грибушинские чтения-2009: музей в пространстве и времени: тез. докл. и сообщ. VII межрегион. науч.-практ. конф. – Кунгур, 2009. – С. 235-236.
10. Наугольных С.В., Линкевич В.В. Флора аргинского яруса (нижняя пермь) стратотипического региона (Средний Урал) // Социально-экологические технологии. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 133-150. – DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-133-150.
11. Цимбал В.А. Ископаемые остатки растений из отложений казанского яруса местонахождения Тарловка-1 (правый берег реки Волги, Татарстан) // Палеонтология и эволюция биоразнообразия в истории Земли (в музейном контексте): сб. науч. тр. – М., 2012. – С. 82-91.
12. Наугольных С.В. Пермские флоры Урала // Тр. Геологич. ин-та. – 2007. – Вып. 524. – С. 322.
13. Наугольных С.В. Новый вид рода *Psugmophyllum* Schimper из нижней перми Урала // Палеонтологический журнал. – 2012. – № 2. – С. 98-107.
14. Биологический энциклопедический словарь / Гл. ред. М.С. Гиляров. – М.: Сов. Энциклопедия, 1986. – 864 с.

УДК 579.68+550.46

DOI:10.7242/echo.2022.1.5

О НАХОДКЕ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ПРУДЕ-ОТСТОЙНИКЕ СОЛИКАМСКОГО МАГНИЕВОГО ЗАВОДА

И.И. Чайковский, Т.В. Фадеева, Е.П. Чиркова
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Исследованы химический состав воды и биота пруда отстойника Соликамского магниевого завода. Показано его расслоение по минерализации: 13,15-15,3 г в поверхностном слое и в несколько раз выше – в придонном. Солевой состав представлен в порядке убывания хлоридами натрия, калия, магния и кальция, в меньшей мере сульфатами. На поверхности дисперсной карбонатной взвеси, поступающей с промышленными стоками, установлены диатомовые водоросли *Cyclotella meneghiniana* Kütz., количество которых составляет до 60 особей на 1 мм². Предполагается, что они наряду с электрохимической коагуляцией способствуют осаждению дисперсных частиц, а их процветание в водоеме связано с повышенным содержанием калия, более чем в три раза превышающем таковое в морской воде.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение, гидрохимия, диатомеи, очистка сточных вод.

ОАО «Соликамский магниевый завод» является одним из крупнейших производителей магния и редкоземельных металлов в России. В процессе технологической переработки руд и последующего гашения кислот известняковыми породами формируются сточные воды, содержащие около 200 мг/л взвешенных частиц размером около 1 мк, что диктовало необходимость их осаждения перед сбросом в р. Каму. Поскольку коагуляция и осаждение коллоидных частиц происходят при взаимодействии с электролитом (раствором солей), было принято технологическое решение соорудить пруд-

отстойник на месте отработанного затопленного карьера нерудных строительных материалов в зоне фильтрационного влияния расположенного рядом шламохранилища ПАО «Уралкалий» [3].

В январе 2013 г. сточные воды предприятия направлены по новому промышленному каналу (бетонному руслу) в пруд-отстойник для дополнительной очистки от известкового осадка [2]. Эффективность предложенного решения подтвердилась устойчивым осаждением взвеси в зоне, ограниченной первой сотней метров от водовыпуска (рис. 1) [3]. Переданные для исследования пробы, отобранные сотрудниками лаборатории проблем гидрологии суши ГИ УрО РАН, показали, что микронные частицы карбоната кальция при взаимодействии с соленой водой образуют флоккулы размером 0,3-1 мм (рис. 2).

Результаты химических анализов воды из различных частей и слоев пруда-отстойника позволяют показать (рис. 3), что в нем произошло расслоение рассолов. В приповерхностном слое минерализация составляет 13,15-15,3 г/дм³, а в придонном – в несколько раз выше. Соотношение между основными компонентами (K-Na-Mg и Cl-SO₄) на различных глубинах относительно близкие, отличаясь некоторой обогащенностью магнием поверхностного слоя. По сравнению с морской водой рассолы пруда-отстойника характеризуются значительно меньшей (почти трехкратной) сульфатностью и большей (в три раза в поверхностном и в тридцать раз в придонном) обогащенностью калием и кальцием (в 4-5 раз).

Таким образом, в пруду-отстойнике под влиянием шламохранилища сформировалась геохимическая среда, характеризующаяся хлоридным калий-натриевым составом рассолов, существенно отличающимся от морской воды. В водоеме проявилась расслоение: в поверхностном слое воды по общей минерализации уступают морским (34,7 г/дм³), а в нижнем превышают.



Рис. 1. Положение пруда отстойника Соликамского магниевого завода и вид дельты в устье промышленного канала сложенной карбонатными осадками (по <https://yandex.ru/maps/geo/perm/53105210/...>)

Исследование известковых флокулированных частиц из поверхностного слоя пруда-отстойника на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20 в ГИ УрО РАН позволило выявить присутствие на них двух таксонов диатомовых водорослей (рис. 4) с максимальной плотностью 60 особей на 1 мм².

В данной экосистеме наблюдается резкое доминирование планктонно-бентосной диатомовой водоросли *Cyclotella meneghiniana* Kützing, 1844 из семейства Stephanodiscaceae (рис. 4 А, С). Экземпляры вида представлены многочисленными одиночными клетками в форме круглых коробочек. Размеры краевой зоны варьируют (до половины длины радиуса). Радиальные ребра грубые, клиновидные (более широкие в основании у края створки и постепенно сужающиеся к концам) с частотой 9-11 на 10 μm. Центральное поле бесструктурное. Размерные данные клеток локальной популяции вида 13, 6-19,8 μm. Среди клеток нормального строения выявлен экземпляр аномальной структуры с разделением центрального поля (рис. 4 В).

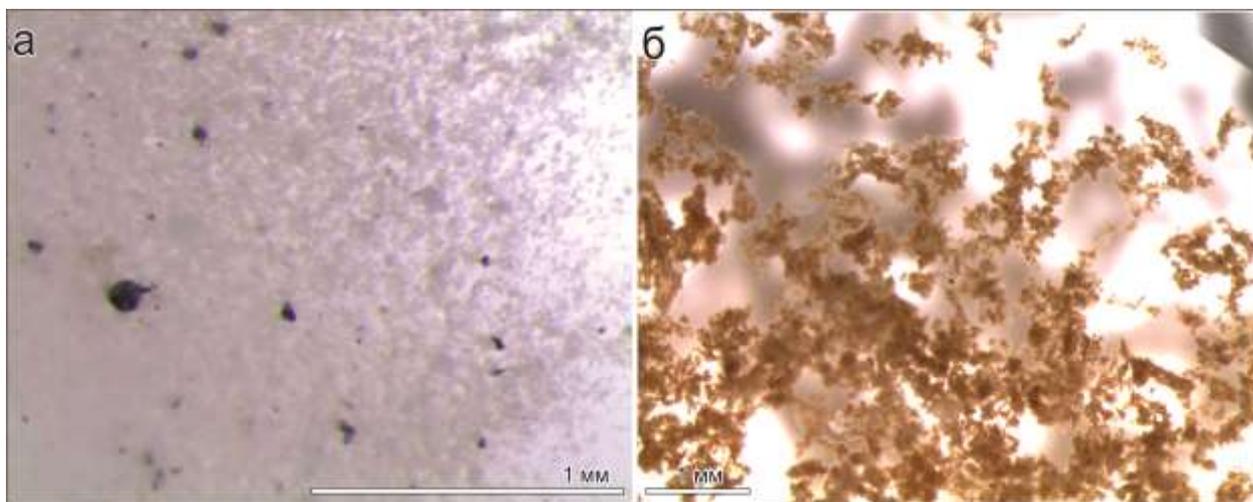


Рис. 2. Общий вид проб карбонатной взвеси из сточных вод у насосной станции (а) и флокулированного осадка из поверхностного слоя пруда-отстойника (б) контактировавшего с минерализованной водой

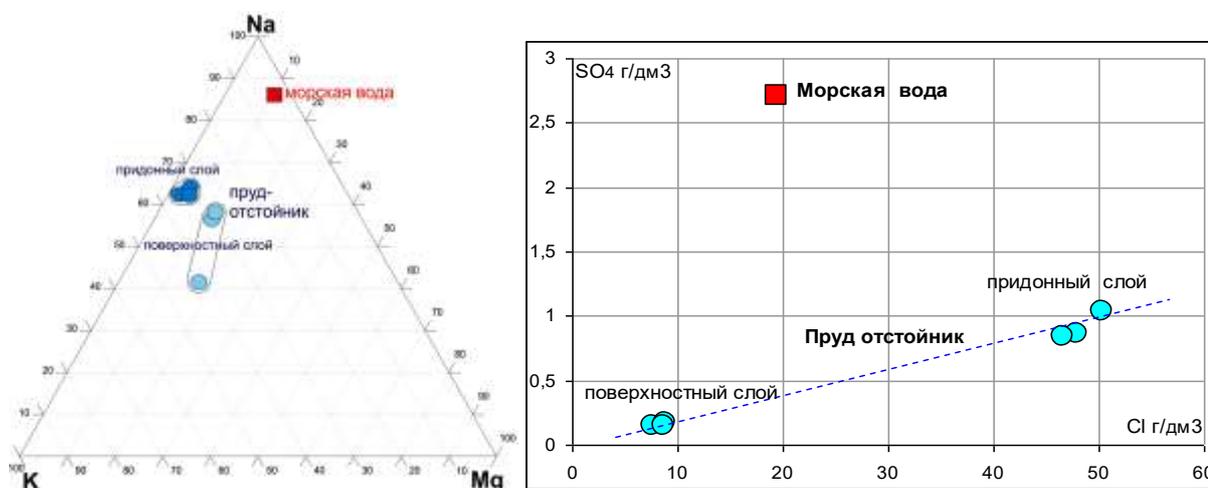


Рис. 3. Соотношение основных катионов и анионов в воде пруда отстойника

Обнаружена одиночная клетка ланцетной формы с клювовидными концами створки, с радиальными штрихами в основной части и параллельными штрихами на концах створки, частота штрихов около 16 на $10\ \mu\text{m}$ (рис. 4 D). Размеры клетки: длина $27,7\ \mu\text{m}$, ширина $8,6\ \mu\text{m}$. Центральное поле не визуализируется. По морфологическому строению и размерным пропорциям данная клетка ближе всего к виду *Navicula salinarum* Grunow, 1880, однако для более точного видового определения требуются дополнительные данные по морфоструктуре, в особенности в пределах центрального поля.

Центрическая диатомовая водоросль *Cyclotella meneghiniana* классифицирована F.C. Hustedt [9] как галофильная. По степени галобности вид отнесен к этой же группе в сводке по водорослям – индикаторам оценки качества окружающей среды [1]. По мнению А.П. Скабичевского [4] данный вид чаще встречается в пресных водах, но обладает способностью переносить значительную степень засоленности, таким образом, является скорее индифферентным организмом. По литературным данным, эта диатомовая водоросль обнаружена и в пресноводных, и в морских средах [6, 10].

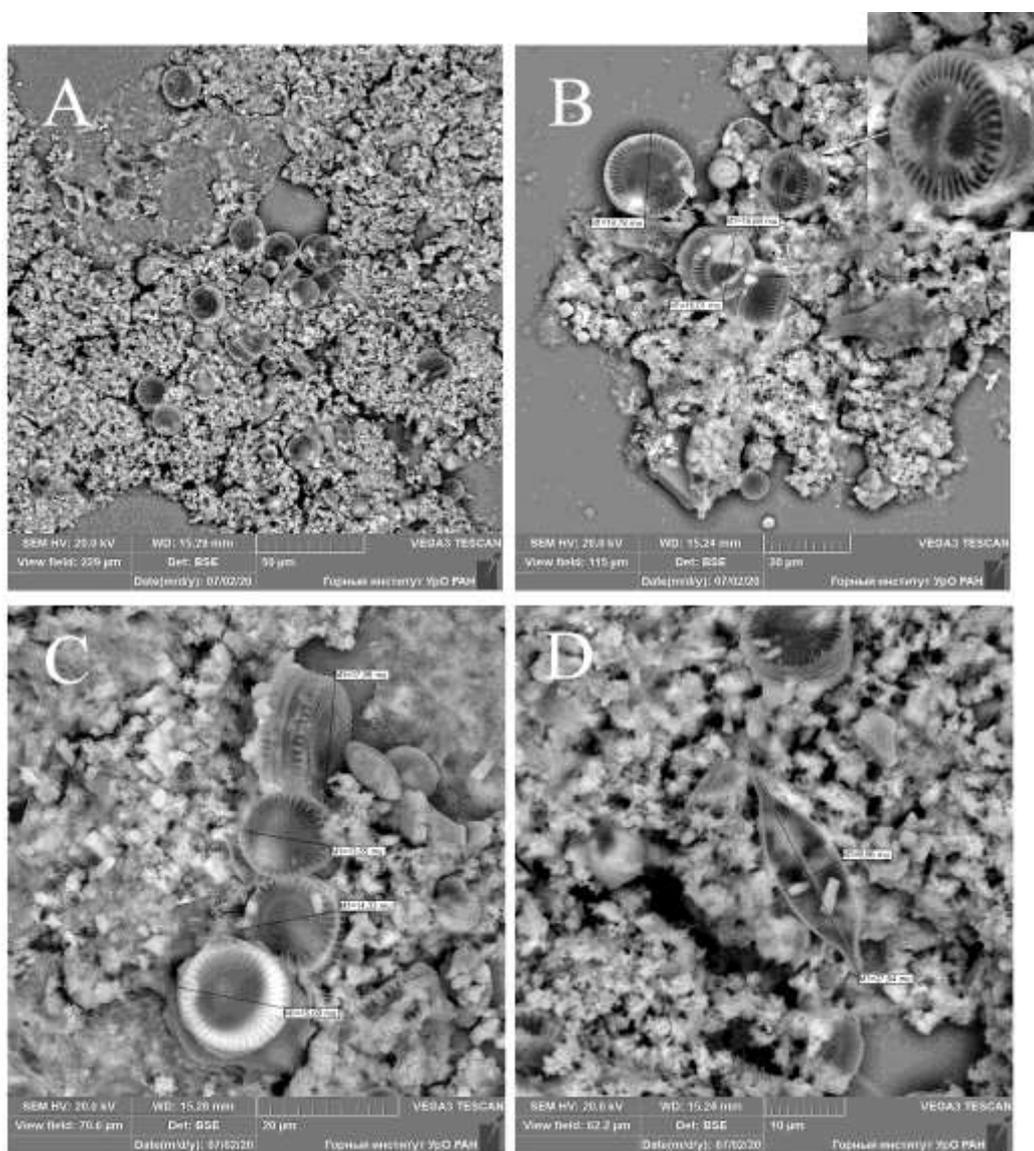


Рис. 4. Диатомовые водоросли пруда-отстойника ОАО «Соликамский магниевый завод». А, С – скопления *Cyclotella meneghiniana*; В – *Cyclotella meneghiniana* с аномальной морфологией; D – *Navicula cf. Salinarum*

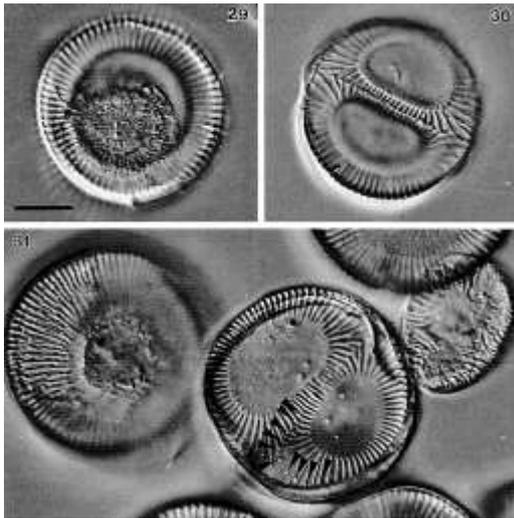


Рис. 5. Аномальные створки различных клонов водорослей *Cyclotella meneghiniana* при солености среды 16 %. Оптический микроскоп (LM) ЛМ; масштабная линейка (29) = 10 μm . Из: [8, стр. 264].

Выводы

Морфологически измененные формы *Cyclotella meneghiniana* (рис. 5), аналогичные по строению обнаруженной в исследуемом пруде-отстойнике аномальной клетке, наблюдались исследователями ранее в экспериментальных средах с относительно высокой соленостью (16%) и было выдвинуто предположение, что аномальные морфологические структуры вызваны осмотическим стрессом [8].

Cyclotella meneghiniana отнесена к видам с относительно высокой сапробностью (способностью выживать в загрязненной органикой среде), значение индекса $S = 2,6$ (при значениях S от 0 до 4) [1].

В видовом соотношении рассматриваемое сообщество диатомовых водорослей существенно беднее такового, обнаруженного в месте разгрузки рассолов Людмилинской скважины, характеризующейся хлоридно-натриевым составом и минерализацией $8,95 \text{ г/дм}^3$ [5, 7].

Учитывая крайне низкое видовое разнообразие, резкое доминирование *Cyclotella meneghiniana* и наличие экземпляра аномальной морфологической формы этого вида, можно сделать вывод, что рассматриваемая экосистема пруда-отстойника находится под воздействием средовых факторов, диапазон действия которых не вызывает угнетения жизнедеятельности только определенных стрессоустойчивых организмов.

Предварительные исследования состава рассолов и биоты пруда-отстойника «Соликамского магниевго завода», в который выпускается сточные воды, содержащие взвешенные дисперсные частицы карбоната кальция, позволили выявить благоприятные условия для развития представителя стефанодисковых диатомей *Cyclotella meneghiniana*. Выдвинута гипотеза, что прикрепление водоросли к взвешенным частицам карбоната кальция наряду с электрохимической флокуляцией может способствовать осаждению механических взвеси и это, возможно, дает основание рассматривать эти организмы в качестве перспективного (микробиологического) средства очистки сточных вод в условиях высокой активности калия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000400-0)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баринаева С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Эколого-географические характеристики водорослей-индикаторов // Водоросли-индикаторы в оценке качества окружающей среды. – М: Изд-во ВНИИ природы. 2000. – 150 с.: ил.
2. Ежеквартальный отчет ОАО «Соликамский магниевый завод» за 1 квартал 2013 г. – Текст электронный. – URL: <http://files.conomy.ru/files/otchety/506/506-1-2013.pdf>.
3. Перепелица Д.И., Лепихин А.П., Лепешкин С.А. Использование эффекта сопутствующей флокуляции при очистке сточных вод от мелкодисперсных взвешенных частиц // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2021. – № 6. – С. 126-141. – DOI: 10.35567/1999-4508-2021-6-7.
4. Скабичевский А.П. Планктонные диатомовые водоросли пресных вод СССР: Систематика, экология и распространение. – М.: Из-во МГУ, 1960. – 350 с.: ил.
5. Чайковский И.И., Коротченкова О.В., Федоров Т.В. Современное минералообразование в месте разгрузки рассолов Людмилинской скважины (г. Соликамск, Пермский край) // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Геология. – 2019. – Т. 18, № 4. – С. 347-355. DOI: 10.17072/psu.geol.18.4.347.
6. Carpelan L.H. Revision of Kolbe's System der Halobien based on diatoms in California lagoon // Oikos. – 1978. – V. 31. – P. 112-122.
7. Fadeeva T., Chaikovskiy I., Chirkova E. The biota in the brine discharge area of Ludmilinskaya well (Solikamsk, Russia) // Mine water: Technological and Environmental challenges. Proceedings of International Mine Water Association conference 2019, 15-19 jule / Perm state University, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS. – Perm, 2019. – P. 656-659.
8. Håkansson H, Chepurnov V A study of variation in valve morphology of the diatom *Cyclotella meneghiniana* in monoclonal cultures: effect of auxospore size and different salinity conditions // Diatom Research. – 1999. – V. 14, № 2. – P. 251-272.
9. Hustedt F. Die Kieselalgen Deutschlands, Österreichs und der Schweiz unter Berücksichtigung der übrigen Länder Europas sowie der angrenzenden Meeresgebiete // Kryptogamen Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz / ed. Rabenhorst L. – Leipzig.: Akademische Verlagsgesellschaft m.b.h., 1928. – 7 (Teil 1, Lief. 2); P. 273-464, figs 115-258.
10. Tuchman M.L., Theriot E., Stoermer E.F. Effect of low level salinity concentrations on the growth of *Cyclotella meneghiniana* Kiitz. (Bacillariophyta) // Archiv für Protistenkunde. – 1984. – V. 128. – P. 319-326.