Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 4 / 2025, Vol. 17, Iss. 4 https://esj.today/issue-4-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/56NZVN425.pdf

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Молодкина, Л. М. Сравнительный анализ состояния водоемов техногенного и природного происхождения в районе закрытой угледобычи вблизи г. Инты / Л. М. Молодкина, Л. А. Дудкин, Е. Ю. Негуляева // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 4. — URL: https://esj.today/PDF/56NZVN425.pdf.

For citation:
Molodkina L.M., Dudkin L.A., Negulyaeva E.Yu. Comparative analysis of the state of water bodies of technogenic and natural origin in the area of closed coal mining near the city of Inta. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(4): 56NZVN425. Available at: https://esj.today/PDF/56NZVN425.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 504.455/064

Молодкина Людмила Михайловна
ФГАОУ «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Профессор
Доктор физико-математических наук, профессор
E-mail: molodkina.lm@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6056-6618
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=99645
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6603631466

Дудкин Леонард Александрович
ФГАОУ «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: dudkinleonard@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1302490

Негуляева Екатерина Юрьевна
ФГАОУ «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: katnegspb@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5511-2913
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=161102
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56226509200

Сравнительный анализ состояния водоемов техногенного и природного происхождения в районе закрытой угледобычи вблизи г. Инты

Аннотация. Предприятия угледобычи после закрытия продолжают оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Данная работа посвящена изучению состояния водных объектов на месте закрытых угольных шахт вблизи города Инты. Авторами проведено изучение трех водоемов на техногенно нарушенной территории в сравнении с озером природного происхождения. Кроме визуального осмотра проведен анализ проб воды методами спектрофотометрии, спектрофлуориметрии, потенциометрии и кондуктометрии. Визуальный осмотр показал, что берега озер на техногенно нарушенной территории в разной степени образованы искусственной насыпью серого цвета, на которой сформировался растительный покров, отличающийся по видовому разнообразию, силе развития, густоте и высоте. Также нами отмечены различия в цвете воды водоемов (от коричневого до бирюзового), в степени

заболоченности и цветения. Авторами показано, что пробы воды двух изучаемых водоемов имеют такие же характеристики, как вода из природного озера — характерные для природных вод с растворенными органическими веществами абсорбционные спектры, характерные для примесей гуминового и белкового типа спектры регистрации и возбуждения флуоресценции, нейтральные значения pH, но более высокую электропроводность (в 2–4 раза). Для воды третьего водоема показано резкое отличие всех характеристик — абсорбционного спектра (максимум при длине волны 300 нм), спектров флуоресценции (регистрация в полосе с максимумом при 350 нм, возбуждение в диапазоне 240–270 нм), величины pH (3,2), электропроводности (в 4 раза выше, чем для природной воды), повышенное содержание железа и сульфат-ионов. Это позволило отнести воду объекта к кислым шахтным водам. Предложены мероприятия по восстановлению данного водного объекта.

Ключевые слова: угледобыча; техногенно нарушенные территории; водоемы; кислые шахтные воды; спектрофлуориметрия; спектрофотометрия; pH

Введение

В XX веке в разных странах мира активно развивалась угледобыча. В настоящее время значительная часть предприятий по добыче угля закрыта, однако их негативное воздействие на окружающую природную среду не становится меньше. В России с 1994 по 2018 гг. было закрыто 188 шахт и 15 разрезов; в настоящее время (на начало 20-х годов XXI в.) в угольной промышленности ведутся работы на 54 шахтах и 122 разрезах, около половины из которых введены в эксплуатацию после 2000 г. [1]. При добыче угля на поверхность выдаются пустые породы, что сопровождается выбросами пыли и вредных газов; происходит откачка шахтных и карьерных вод, загрязняющих почву и поверхностные водные источники. В районе подземных выработок на большой площади образуются воронки депрессии, заболачиваются или затопляются подработанные территории, засоляются почвы [2]. После закрытия шахт атмосфера продолжает загрязняться метано-воздушной смесью, продуктами окисления и неполного сгорания самовозгорающихся углей. Физическое и химическое выветривание горных пород приводит к переносу загрязняющих веществ на большие расстояния, увеличивая площадь загрязнения [3]. При закрытии угольных шахт методом затопления происходит свертывание их депрессионных воронок, а также изменение направлений разгрузки загрязненных подземных вод, которые могут начать разгружаться в поверхностные водотоки, сильно увеличивая их загрязненность и приводя к подтоплению зданий. На территории ликвидированных шахт появляются провалоопасные зоны [3].

Применение ресурсно-экологического метода позволяет расписать воздействие горных предприятий на окружающую среду как: (а) изъятие полезных ископаемых и сопутствующих пород из геосреды (приводящее к увеличению трещиноватости горных пород, изменению напряженного состояния массива, изменению уровней водоносных горизонтов и т. п.); (б) внесение в нее загрязняющих веществ в твердом, жидком и газообразном виде; (в) изменение физических и геофизических полей (гравитационного, электрического, магнитного, акустического) [4].

Как описано в ряде публикаций, все угледобывающие регионы России испытывают серьезные экологические проблемы. В работе [5] обсуждается влияние на окружающую среду угледобычи открытым и подземным способом. При открытом способе происходит влияние на все компоненты природной среды путем изъятия земель, нарушения рельефа, деградации почвы, прямого и косвенного воздействия на растительный и животный мир, на атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды. В поверхностные воды загрязняющие вещества поступают в результате водоотлива из горных выработок и дренажного стока «пустых» пород.

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Подземная добыча угля наибольшее влияние оказывает на геологическую среду, поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух, растительный и животный мир. Основным фактором влияния на поверхностные воды называется сброс загрязненных шахтных вод, содержащих взвешенные частицы угля и породы, коллоидные примеси, бактерии, минеральные примеси. Часто шахтные воды имеют кислую реакцию (например, в Донбассе после сброса шахтных вод pH воды в водотоках упал с 7,9 до 3,6). Как правило, возрастает минерализация поверхностных вод и содержание сульфатов.

В работе [6] приведены данные по экологическим проблемам, возникшим при закрытии угольных шахт в разных странах мира (в Англии, Германии, Южной Африке, Нигерии, Южной Корее, Австралии и др.), а также в таких угольных бассейнах как Кизеловский (Западноуральский), Кузнецкий, Донецкий, Партизанский (Юг Приморья). Сделан вывод о том, что закрытие угольных шахт приводит к повышению уровня воды, заболачиванию низинных территорий, к деформации зданий, образованию провалов грунта, выбросу шахтного газа и т. д. По итогам своих предыдущих исследований, авторы работы [6] связали состав шахтных вод (разное соотношение гидрокарбонат-, сульфат- и хлорид-ионов) с уровнем кислотности среды и привели соответствующие примеры кислых вод (pH 2,5) — шахтные воды Кизеловского угольного бассейна, щелочных (pH 10,4) — Кузнецкий бассейн, шахтных вод переменной кислотности (pH от 2,7 до 8,0) — Донецкий угольный бассейн. В той же работе [6] приведена классификация шахтных вод в международной сети. Она включает три основных типа: кислый (acid mine drainage — AMD, pH < 6, нейтральный (neutral mine drainage — NMD), солёный (saline drainage — SD) с pH > 6, при этом в NMD-водах общее содержание растворенных твердых веществ (total dissolved solids — TDS) < 1 000 мг/дм^3, а в SD — 1 000 < TDS < 10 000 мг/дм^3. При pH 2–4 воды могут иметь смешанный катионный состав, при pH 4–6 — кальциевый (магниево-кальциевый), при pH > 8.0 — натриевый.

В разных источниках описан механизм формирования кислых вод. Угли и угленосные породы богаты сульфидной и органической серой. В водной среде компоненты вскрышных пород подвергаются воздействию кислорода, что приводит к окислению сульфидов. Природные бактерии могут ускорить процесс, способствуя разрушению сульфидных минералов. Окисление пирита приводит к образованию серной кислоты, двухвалентного железа и ионов водорода [7; 8].

Шахтные воды сбрасываются на поверхность, на породных отвалах формируются кислые стоки, все это приводит к техногенному воздействию на прилегающую территорию. В результате физико-химические свойства техногенно загрязненных почв резко отличаются от исходных — почвы имеют кислую реакцию, в поверхностном слое наблюдается повышенное содержание сульфатов и микроэлементов, почвы сами становятся вторичными источниками загрязнения поверхностных и подземных вод [7].

В статье [9] указаны масштабы загрязнений геосфер на территории России со стороны угледобывающей промышленности: выбросы в атмосферу составляют 3 % от общего объема загрязнений от всех отраслей, сбросы — 7 %, нарушение земель — 9 %. Отмечается, что косвенное воздействие значительно превышает прямое. Среди основных экологических проблем угольной промышленности названы:

- сброс на рельеф местности и в водные объекты шахтных и карьерных вод, что приводит к засолению, закислению и заиливанию водных объектов и водосборных площадей, загрязнению нитратами, фосфатами, сульфитами, фенолами, свинцом, цинком;
- нарушение естественного режима подземных вод, истощение насыщенных питьевой водой водоносных горизонтов;

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

- выбросы метана при разработке месторождения, самовозгорание угля на шахтах, карьерах, на отвалах, загрязнение атмосферного воздуха оксидами углерода, азота и др.

В работе [10] приводится количественная информация об откачанных шахтных водах: 85–87 % малоочищенных шахтных вод сбрасывается в водные ресурсы региона. При постоянном загрязнении поверхностные воды становятся мутными и окисленными, повышается их кислотность, жесткость и минерализация. Поскольку горные работы со временем переходят на более глубокие горизонты, подземные водоносные горизонты сильно истощаются. На примере реки Томь (Кузбасс) описана ситуация, при которой угольный разрез перешел на глубину 350 м, а из водоносного горизонта, находящегося на глубине 200 м, при закрытии шахты и разрезов вода пошла вниз, а оттуда, уже загрязненная, откачивалась на поверхность как сточная вода. В результате в поверхностные воды попали различные кислоты, соли тяжелых металлов (в частности, свинец и цинк), нитраты, фосфаты, сульфиты [10].

В публикации [11], кроме основного состава углей — углерода (до 92 %), серы, азота, водорода, приводятся интервалы концентраций примесных элементов (в г/т угля): Ge — 0–20,8; Li — 2–48; Co — 2–10; Mn — 40–158; As — 0–64; Ni — 7–80; Hg — 0,004–0,1; Pb — 14–71; Sb — 1–5; P — 0–135; F — 11–208; Cr — 10–76; Zn — 5–146; Be — 0,3–1,4; Se — 0–0,1. Также перечислены примесные газы: кроме метана и хлора в углях присутствуют NO_2; NH_4; H_2S; CS_2; SO_2; P_2O_5. При попадании в организм человека эти элементы вызывают дистрофические и аллергические заболевания верхних дыхательных путей, заболевания нервной системы, печени, кроветворной системы и т. д.

Поскольку данная работа посвящена анализу состояния водных объектов на месте закрытых угольных шахт города Инты, особое внимание уделено экологическим проблемам Печорского угольного бассейна. Рядом с городами Воркута и Инта (между которыми 228 км) в разные периоды работало более десятка шахт. По данным публикации [12] в настоящее время работают четыре шахты, две обогатительные фабрики и один карьер по добыче угля. Добыча велась и ведется подземным способом. На Воркутинском месторождении глубина разработки составляет 300–900 м, на Интинском — 150–600 м.[1] Твердые отходы добычи и обогащения каменных углей Печорского угольного бассейна отличаются повышенным содержанием таких опасных элементов как Ni, V, Mn, S, Cu и др. [13]. Отвальные массы являются одним из основных источников загрязнения окружающей природной среды. Они формируются из вмещающих горных пород и, в основном, представлены аргиллитами углистыми и слабоуглистыми, аргиллитами слоистыми с алевролитом и реже крупнозернистыми песчинками, углем. В минеральном составе преобладают каолинит, монтмориллонит, кварц, среди минералов-примесей (менее 5 %) — гидрослюды, кальцит, пирит, полевые шпаты. Печорские угли обогащены барием, скандием, титаном, цирконием, гафнием, ниобием, хромом, никелем. Также отмечаются накопления редких щелочей, стронция и бария, галлия, иногда ванадия, хлора и брома [13].

По данным космической съемки земная поверхность двух исследованных в работе [9] секторов площадью 52 и 5 тыс. га, привязанных к городам Воркута и Инта, равнинная без существенных перепадов. В границах секторов наблюдается большое количество озер и болот, ручьев и рек. Установлено, что сектор г. Инты, где производилась добыча угля, представлен лесотундрой, а г. Воркуты — тундрой. Также установлено, что техногенные ландшафтные объекты, в том числе и водоемы с шахтными водами, концентрированно находятсяв непосредственной близости от г. Инты на юг и восток от городской черты.

[1] Горная энциклопедия. Печорский угольный бассейн. http://www.mining-enc.ru/p/pechorskij-ugolnyj-bassejn.

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

В целом, в республике Коми (к которой относится Печорский угольный бассейн) находится большое количество озер различного происхождения[2]: ледниковые (как правило, располагаются на большой высоте, отличаются большой глубиной — более 20 м), плотинные (образованные в результате подпруживания реки, глубиной до 30 м, с растительностью по берегам и обилием рыбы), моренные (неправильной формы, малой глубины, с разнообразной донной растительностью, многие из них находятся в стадии зарастания и заторфовывания), пойменные (находятся по поймам равнинных рек, часто имеют вытянутую вдоль реки форму), озера, находящиеся в болотных массивах (отличаются небольщими глубинами, большинство находится на стадии зарастания), озера, расположенные на плоских водоразделах в северных и центральных районах Коми (небольшие, довольно глубокие), термокарстовые озера тундровой и лесотундровой зоны (глубиной до 7 м, с низкими обрывистыми берегами, торфяными, заболоченными местами). Искусственные водоемы представлены небольшими водохранилищами, обводненными карьерами и котлованами. Общая площадь естественных озер составляет 1 784 кв. км, в то же время более 70 000 водоемов имеют площадь менее 1 га.

В последние два десятилетия опубликован ряд работ о восстановлении и использовании земель, нарушенных в результате открытых и подземных угольных выработок, а также водных объектов, загрязненных шахтными водами.

В разные годы появлялись сообщения о программе реконструкции стоимостью 2,2 млрд евро района старых шахт Восточной Германии, где добыча угля прекращена в 1999 году (Lusatian Lake District).[3] Ландшафт Lusatia был преобразован путем затопления карьера водой с образованием искусственного озера. На озере планируется разместить тепловой насос мощностью 35 МВт, который может покрыть потребность района в электроэнергии на 40 %. В публикациях[4] приведены примеры реконструкции бывших угольных шахт в разных странах (в Индонезии, Германии, Австралии, США, Канаде) и проводимых мероприятий — стабилизации рыхлых грунтов, таких как глина и песок, с помощью укрепляющих нагелей, ликвидации насыпей и отвалов, очистки загрязненных земель, ручьев, кислых шахтных стоков. Сообщается о том, что угольная шахта Нового Южного Уэльса будет преобразована в автомобильный и туристический курорт. Вышла публикация[5] о возможности очистки тысяч миль водных путей, загрязненных отходами угледобычи у истоков р. Потомак в штате Западная Вирджиния. Из токсичных вод будут извлекаться критически важные металлы (в т. ч., кобальт и никель), а также редкоземельные металлы. Загрязненная вода закачивается в гигантские круглые резервуары, куда добавляется известь для повышения pH и осаждения тяжелых металлов (никеля, кобальта). Путем коррекции pH добиваются преимущественного осаждения редкоземельных металлов (а не общей массы тяжелых металлов). Согласно другому, пилотному, проекту в штате Кентукки редкоземельные металлы добываются из твердых угольных отходов. Еще один проект в штате Огайо направлен на сбор оксида железа из

[2] Озера республики Коми. http://wp.limno.org.ru/win/lakerus/kmr_03.htm.

[3] Paul Sullivan East Germany's old mines transformed into new lake district (17 Sep 2016) https://www.theguardian.com/travel/2016/sep/17/lusatian-lake-district-project-east-germany.

Megan Gannon From Mining Hellscape to Holiday Paradise. How Germany's Lusatian Lakes District is remaking an entire region through broad-scale landscape re-engineering. https://www.atlasobscura.com/articles/german-coal-mining-vacatio.

[4] Jess Watts Rehabilitating former coal mines (15 April 2025). https://www.worldcoal.com/coal/15042025/rehabilitating-former-coal-mines/.

NSW coal mine to be transformed into motor and tourist resort under bold new plans: https://www.news.com.au/national/nsw-act/news/nsw-coal-mine-to-be-transformed-into-motor-and-tourist-resort-under-bold-new-plans/news-story/95dc995992a55a1b59737d674a2c7934.

[5] Austyn Gaffney and Dane Rhys In coal country, a new chance to clean up a toxic legacy (May 19, 2022) https://wvwri.wvu.edu/news/2022/05/23/in-coal-country-a-new-chance-to-clean-up-a-toxic-legacy.

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

шахтной воды и превращение его в пигмент для кирпича и плитки, а также для художественных красок.

Научные достижения последних лет и новые технологии существенно упрощают решение проблемы переработки жидких угольных отходов, содержащих большое количество кислоты и минералов (так называемые «кислые шахтные воды»). Такие воды могут возникать при добыче металлических руд или угля. Общая площадь загрязненных ими рек и ручьев в США оценивается в 19 000 км^2, площадь водохранилищ и озер — в 730 км^2 [14]. В кислых водах угольных шахт кислотность составляет до 20–25 мг/л, концентрация сульфатов до 2 г/л [14].

К активным методам восстановления кислых шахтных вод можно отнести в первую очередь химическую обработку щелочными агентами, биологическое восстановление и удаление трехвалентного железа, токсичных металлов и сульфатов. Мембранная фильтрация, ионообменный метод или электролиз, по-видимому, годится для существенно меньших объемов, чем первые методы. После аэрации кислых шахтных вод и добавления щелочных агентов (таких как известняк, известь, гидроксид натрия, сода, зола) достигаются нейтральные значения pH, что приводит к осаждению гидроксидов. Устойчивость осадков зависит от pH и от окислительно-восстановительного потенциала Eh [14]. К пассивным методам может быть отнесено создание искусственных водно-болотных угодий для фильтрации и очистки кислых шахтных вод. Заброшенные угольные шахты, техногенно-преобразованные территории и водные объекты требуют мониторинга и стратегий управления их реабилитацией.

Как отмечено выше, вокруг города Инты находится большое количество водных объектов — озер, болот, ручьев и рек, в том числе водоемов, заполненных шахтными водами. Для разработки программы восстановления техногенно преобразованной зоны, в частности ее водной составляющей, необходимо получить данные о текущем состоянии этих объектов. Цель данной работы заключалась в оценке состояния нескольких водоемов, находящихся в районе закрытых угольных шахт, вблизи города Инты, с помощью физико-химических методов анализа.

Объекты и методы

В качестве объектов исследования были выбраны четыре водоема, располагающиеся с разных сторон города Инты на расстоянии до 1,7 км. Три из них (№ 1–3) находятся на техногенно нарушенной территории, четвертый является озером природного происхождения.

Водоем № 1 располагается примерно на равном расстоянии (~0,7 км) от города (на юго-запад) и от шахты Западная, водоем № 2 — на расстоянии 1,7 км от города и 1,3 км до шахты Западная, водоем № 3 — на расстоянии 0,7 км от города (на восток) и 1 км от шахты Восточная. Природное озеро (объект № 4) примыкает с северной стороны к черте застройки города Инты.

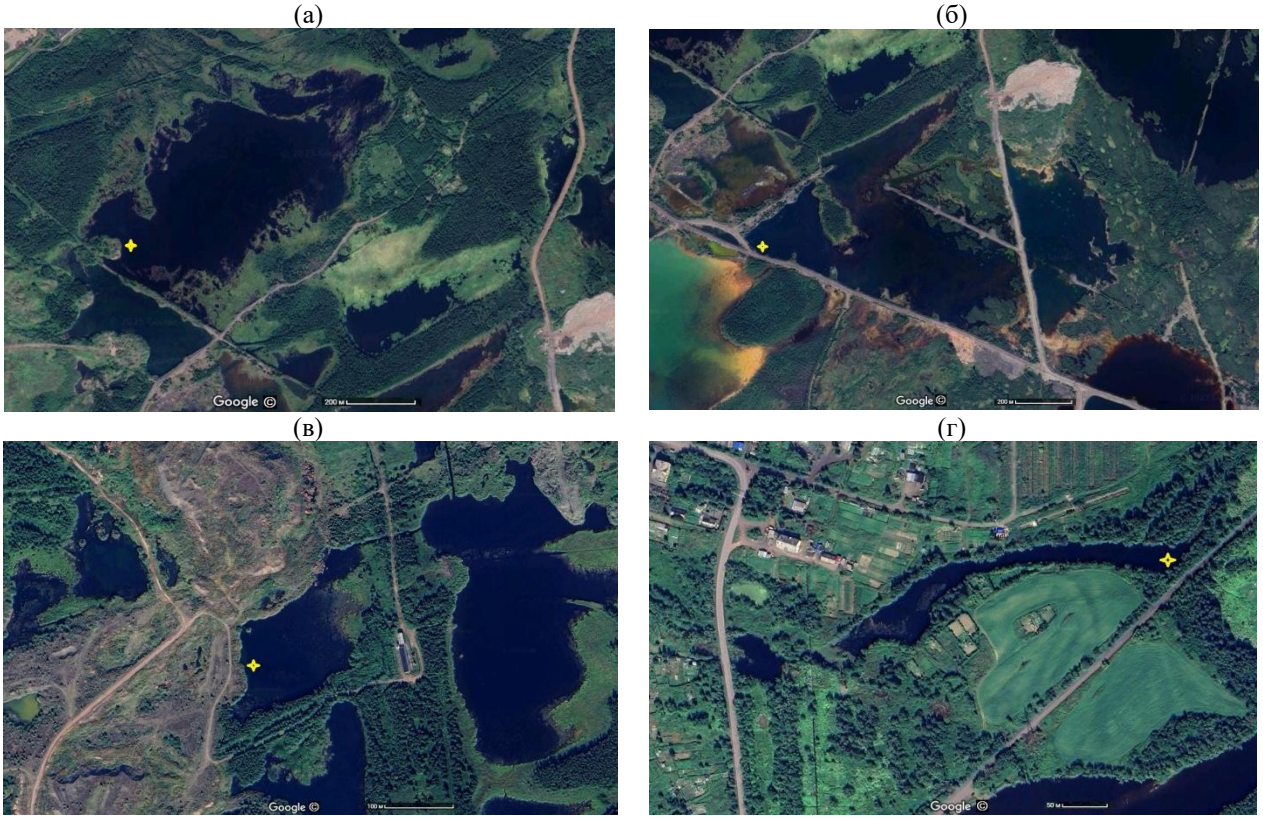
На рисунке 1 а–г представлены спутниковые фотографии (гугл-карта) выбранных объектов. Отбор проб проведен в августе 2024 г., точки отбора указаны на рисунке 1. На тот же момент описано состояние водных объектов.

Берега водоема № 1 с трех сторон, кроме юго-западной, сильно заболочены. Северо-западный берег с болотистыми островами и полуостровами переходит к естественному лесу (тайге). Болотистый береговая полоса на северо-восточной стороне сужается. На юго-восточной стороне в сторону грунтовой дороги имеются участки леса. Четвертый, юго-западный, берег сформирован насыпью из серой породы. Он покрыт растительностью — травой, кустарником и даже деревьями. Встречаются береза, ива, ель, сосна, высота которых доходит примерно до пяти метров. В насыпи имеется непересыхающий пролив, соединяющий

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

водоем с соседним. Скорее всего, водный объект был образован при заполнении грунтовыми водами мульды оседания (понижения земной поверхности), возникшей над подземными выработками. Вода в водоеме прозрачная, имеет коричневый цвет.

(а) (б)



(в) (г)

Желтыми звездочками отмечены места отбора проб

Рисунок 1. *Спутниковые снимки исследуемых водоемов (гугл-карта): № 1 — (а), № 2 — (б), № 3 — (в), № 4 — (г) (выполнено автором на основе сервиса Google карты)*

Водоем № 2 с нескольких сторон обвалован породой серого цвета. Северо-западный берег четкий, на грунтовой насыпи сформировался слабый растительный покров, в то же время, встречаются деревья таких же пород и высоты, как на насыпи озера № 1. Дальше от берега располагаются участки естественного леса, а в самом водоеме находятся острова с естественным лесом и заболоченными берегами. Восточный берег представлен грунтовой насыпью с неразвитым растительным слоем, без деревьев. Грунтовая насыпь с юго-западной стороны имеет среднеразвитый растительный покров с деревьями высотой до трех метров. Водоем связан пересыхающим проливом с соседним мелководным.

Вода в озере имеет лазурную окраску, ее прозрачность зависит от волнения — при спокойной воде прозрачность высокая, при сильном волнении поднимается муть тоже бирюзового цвета. Поскольку уровень воды в водоеме не постоянный, предметы на берегу подвергаются периодическому смачиванию-высыханию, при этом они приобретают буровато-серую окраску.

Рядом с водоемом № 2 располагается действующих полигон твердых коммунальных отходов (на карте светлое пятно в северо-восточном направлении).

Водоем № 3 является частью водной системы, предположительно, имеющей сток в реку Большая Инта. Северный берег озера сформирован искусственной насыпью с маленьким водоемом, переходящей в сглаженный террикон. Растительный покров насыпи слабый, встречаются кусты ивы. Восточный и южный берег естественные, частично заболоченные. У

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

южного берега имеется скопление погибших затопленных деревьев. На поверхности воды в прибрежной зоне на момент осмотра наблюдалось активное цветение.

Происхождение водоема № 3, по-видимому, аналогично происхождению водоема № 1. Такую же природу, скорее всего, имеют соседние водоемы, связанные с № 3 искусственными каналами.

Водоем (озеро) № 4 выбран для сравнения как природный объект. Озеро проточное, в него впадает ручей, имеющий преимущественно тундрово-болотное питание. С западной стороны из озера вытекает ручей, впадающий в соседний водоем. По форме (вытянутое, повторяющее изгиб реки, протекающей в двухстах метрах), водоем относится к озерам пойменного происхождения [15]. Берега водоема естественные, основной растительностью является ива. С восточной стороны озеро примыкает к небольшому участку естественной тайги. Вода в озере довольно прозрачная, имеет коричневый цвет. На момент осмотра наблюдалось цветение с западной стороны.

Пробы воды из всех четырех водоемов отбирали в один день. Анализ проводили в лаборатории инженерно-строительного института (ИСИ) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. При этом применяли спектральные методы анализа — спектрофотометрию и спектрофлуориметрию, и электроаналитические — потенциометрию и кондуктометрию. Использовали, соответственно: спектрофотометр СФ-56 (ЗАО «ОКБ Спектр», Россия); анализатор Флюорат-02-Панорама (ЛЮМЭКС, Россия); pH-метр S40 SevenMulti™; кондуктометр HI8733 (HANNAInstruments).

Ряд химических анализов выполнен в аккредитованной лаборатории.

Результаты и обсуждение

Результаты спектрофотометрического анализа отобранных образцов представлены на рисунке 2, а спектофлуориметрического — на рисунках 3–6. Для удобства сравнения использовали одинаковый масштаб для спектров проб разных водоемов.

Для всех флуориметрических спектров в дополнение к приборной коррекции водили поправку на поглощение флуоресцентного излучения при его прохождении пути от центра кюветы до стенки.

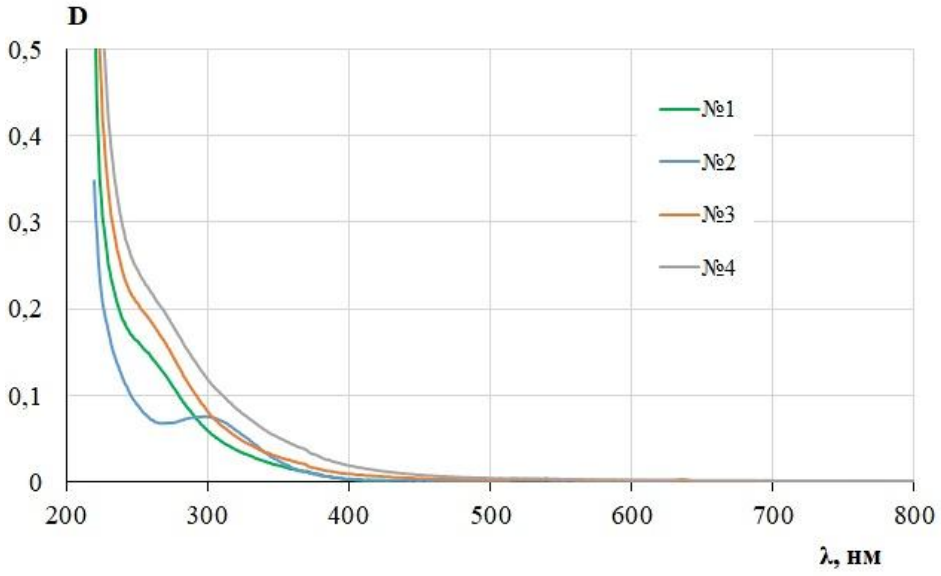
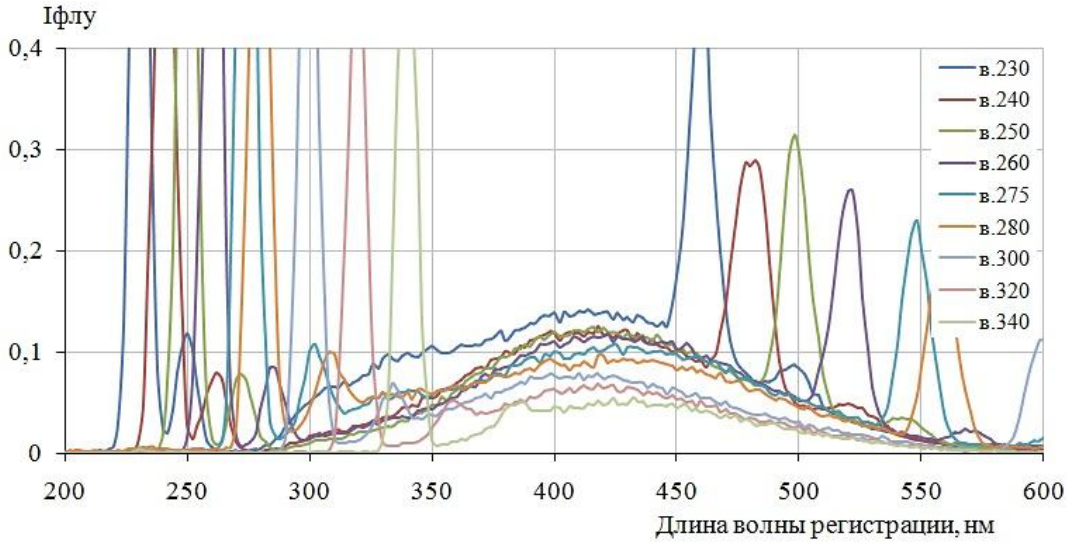


Рисунок 2. *Абсорбционные спектры проб воды из водоемов № 1–4 (выполнено авторами)*

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

а)



б)

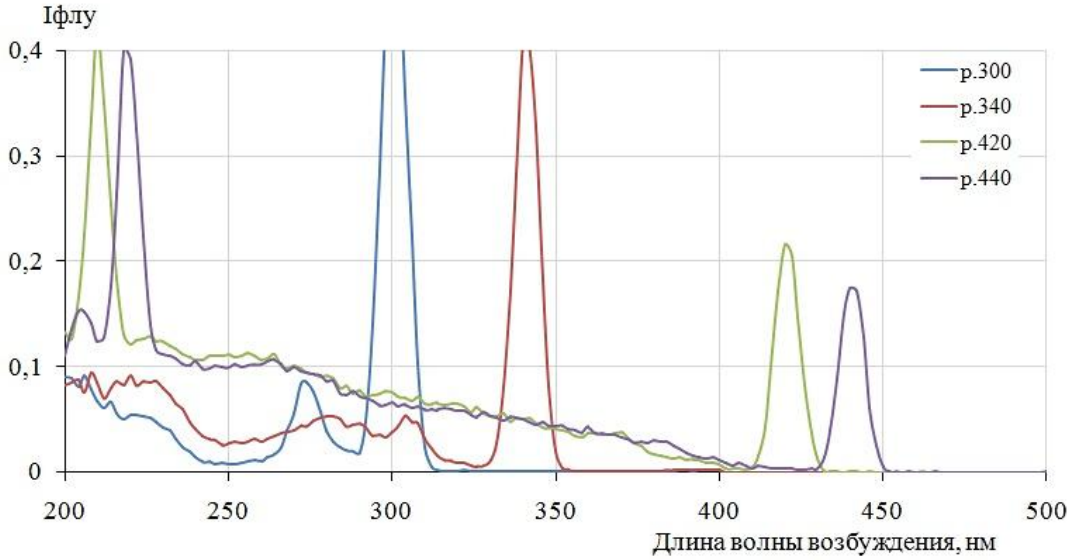
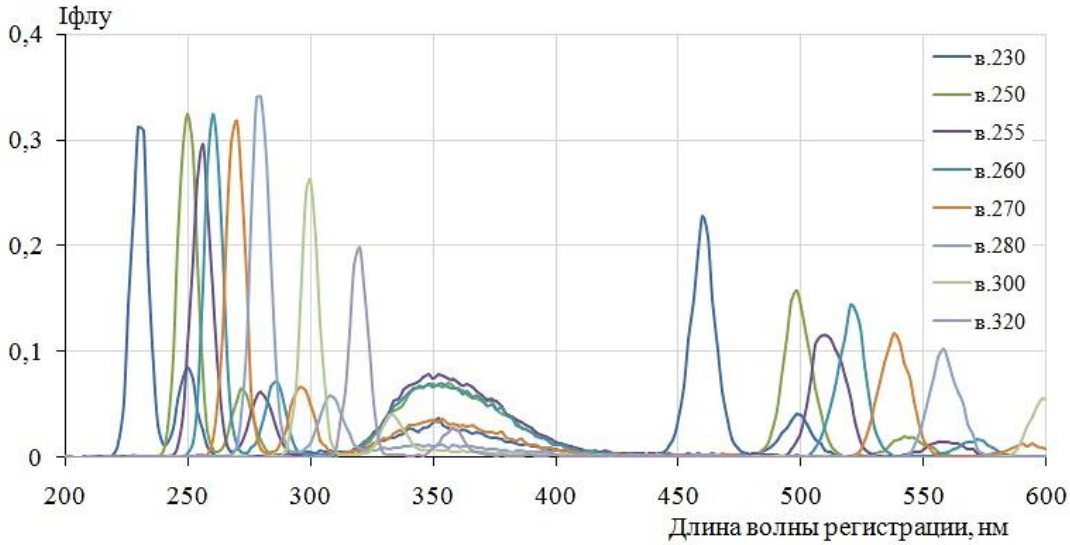


Рисунок 3. *Спектры регистрации (а) и возбуждения (б) флуоресценции пробы воды из водоема № 1(выполнено авторами)*

а)



56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

б)

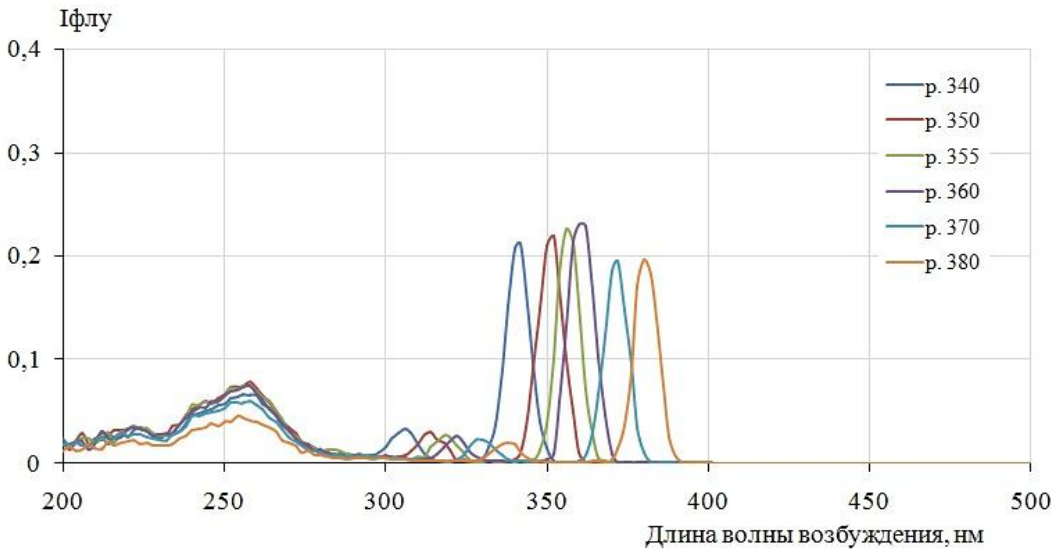
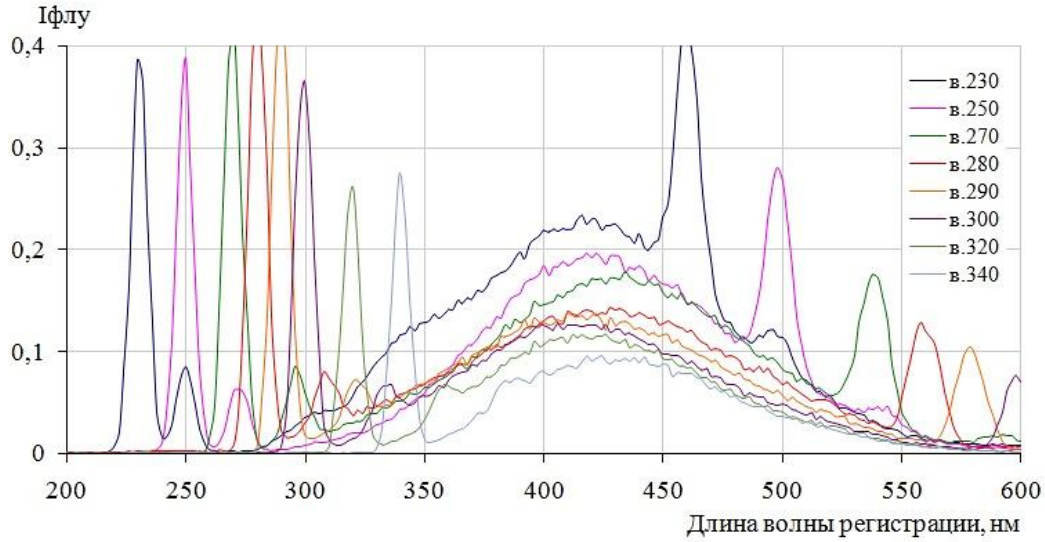


Рисунок 4. *Спектры регистрации (а) и возбуждения (б) флуоресценции пробы воды из водоема № 2 (выполнено авторами)*

а)



б)

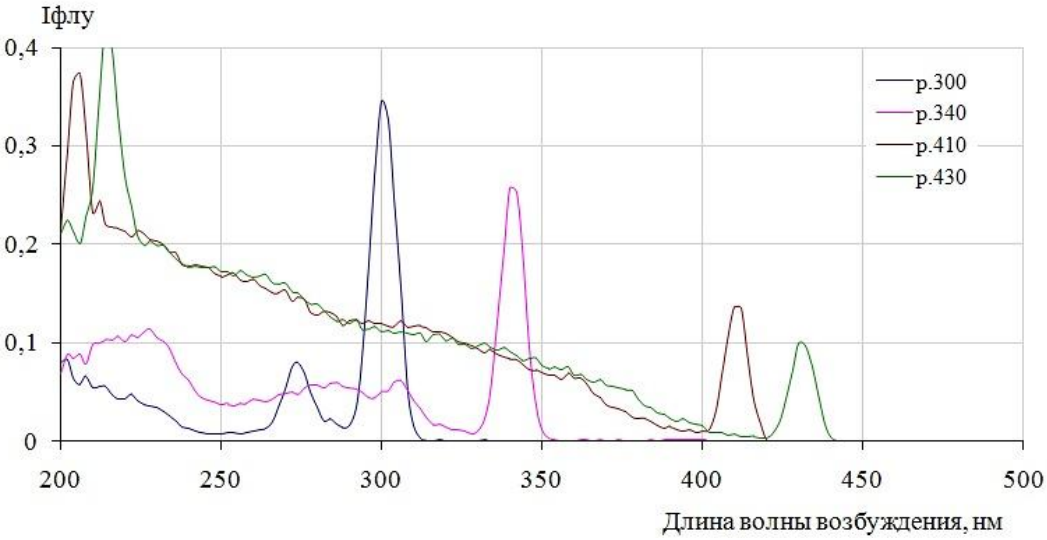
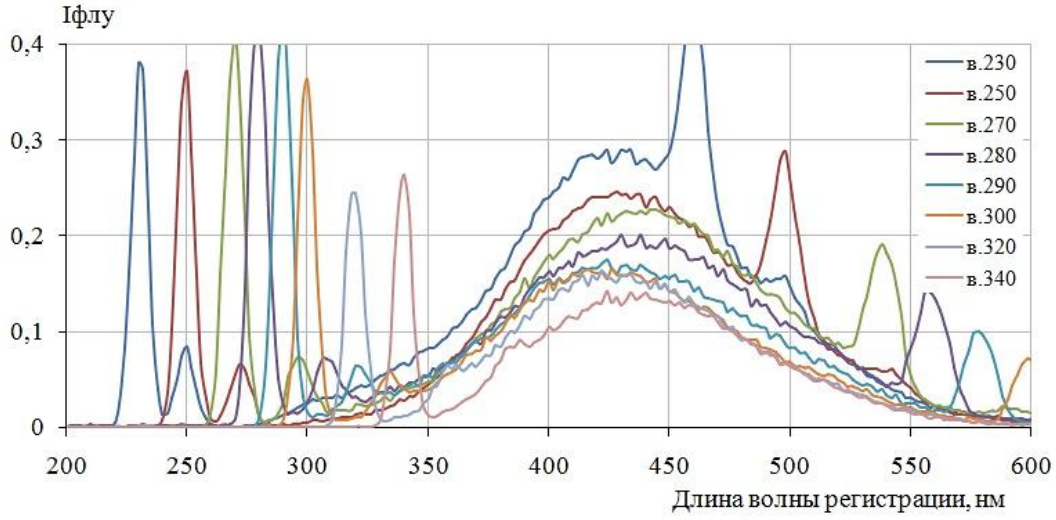


Рисунок 5. *Спектры регистрации (а) и возбуждения (б) флуоресценции пробы воды из водоема № 3 (выполнено авторами)*

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

а)



б)

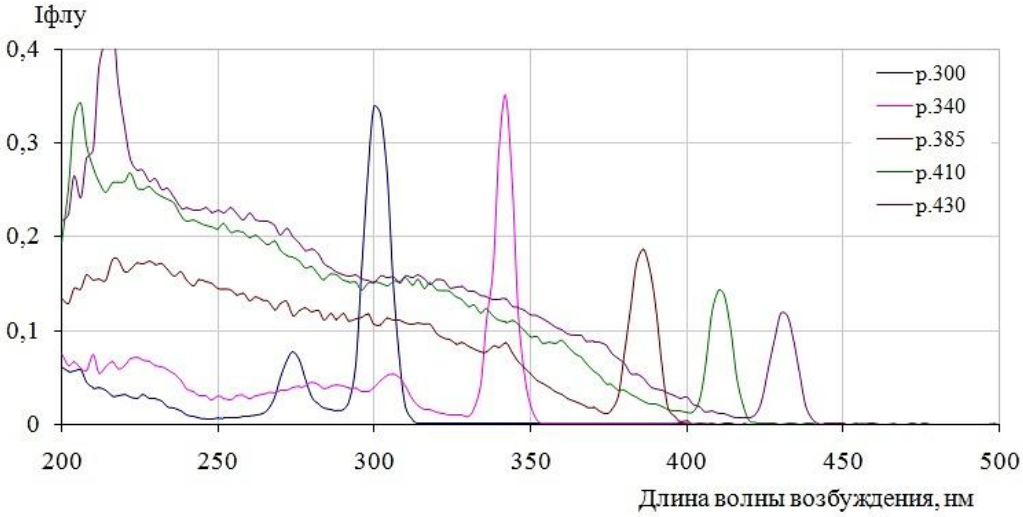


Рисунок 6. *Спектры регистрации (а) и возбуждения (б) флуоресценции пробы воды из водоема № 4 (выполнено авторами)*

Из рисунка 2 следует, что абсорбционные спектры № 1, 3, 4 имеют одинаковый вид — с ростом длины волны оптическая плотность монотонно снижается примерно до длины волны 240 нм, затем в интервале 240–270 нм кривая образует небольшую выпуклость, и далее снова монотонно убывает. Такие спектры обычно характеризуют природные воды с растворенными органическими веществами (РОВ). Спектр пробы № 2 резко отличается от остальных, монотонное снижение оптической плотности происходит до 270 нм, таким образом, отсутствует выпуклость, отвечающая РОВ. Вместо этого регистрируется отчетливый максимум при длине волны 300 нм.

Спектры регистрации флуоресценции всех проб (№ 1-4) (рис. 3 а–6 а) содержат полосы релеевского светорассеяния, максимумы которых соответствуют длинам волн возбуждения и удвоенным длинам волн (второй порядок дифракции), а также полосы Рамановского (комбинационного) светорассеяния на молекулах воды. Что касается полос флуоресценции, то видно, что спектры проб № 1, 3, 4 имеют схожий вид, а спектры пробы № 2 резко отличаются от них. Так, на спектрах проб № 1, 3, 4 регистрируются плохо разрешенные полосы белкового типа, максимумы которых соответствуют длинам волн 300 и 330–340 нм, и широкие полосы гуминового типа, максимумы которых перемещаются в зависимости от длины волны возбуждения, но в целом укладываются в диапазон 420–440 нм. При этом интенсивность

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

флуоресценции в максимуме уменьшается с ростом длины волны. Для природных вод подобное смещение максимума сначала в длинноволновую область, затем в коротковолновую и снова в длинноволновую при переходе от длины волны возбуждения 230 нм к 340 нм с шагом 10–20 нм, было показано неоднократно в работах сотрудников лаборатории ИСИ, в которой проводили анализ проб, например, в [15]. Такое смещение характерно для растворенных (и коллоидных) гуминовых соединений. Спектр возбуждения флуоресценции гуминовых соединений обычно имеет максимум при длинах волн, близких к 210–220 нм, а затем широкую бесструктурную полосу (постепенное снижение интенсивности с ростом длины волны). Из рисунков 3 б, 5 б и 6 б видно, что спектры возбуждения флуоресценции, регистрируемые при длинах волн 410–440 нм, действительно представляют собой широкую бесструктурную полосу (плавное снижение интенсивности от 220 до 420 нм). При длинах волн 205–220 нм максимум интенсивности не обнаруживается из-за полос релеевского светорассеяния; еще одной причиной может быть концентрационное тушение флуоресценции. Таким образом, по спектрам возбуждения и регистрации флуоресценции можно считать, что в водоемах № 1, 3, 4 присутствуют соединения гуминового типа.

Из рисунков 3 б, 5 б и 6 б также видно, что в спектрах возбуждения флуоресценции длине волны регистрации 340 нм соответствуют спектры возбуждения с максимумами при ~230 и 280 нм. При длине волны регистрации 300 нм второй максимум (при 280 нм) перекрыт полосой комбинационного светорассеяния, а первый максимум наблюдается примерно при 230 нм, но не так отчетливо, как в первом случае. В целом, спектры возбуждения флуоресценции подтверждают вывод, сделанный по спектрам регистрации: в водоемах № 1, 3 и 4 присутствуют соединения белкового типа, точнее, соединения, содержащие фенольную и индольную функциональные группы, входящие, соответственно, в аминокислоты тирозин и триптофан.

Если не учитывать возможное тушение флуоресценции, то по содержанию соединений с фенольными группами пробы водоемов № 1, 3, 4 можно расположить в порядке возрастания следующим образом: № 4 < № 3 < № 1, по содержанию соединений с индольными группами: № 4 < № 1 < № 3, по содержанию соединений гуминового типа: № 1 < № 3 < № 4. Водоем № 4, как отмечалось выше, имеет естественное происхождение с подпиткой через ручей болотной водой, что целиком соответствует существенному преобладанию в нем (по сравнению с другими водоемами) соединений гуминового типа.

Спектры пробы № 2, как было отмечено выше, резко отличаются от спектров остальных проб. Из рисунка 4 а видно, что при восьми длинах волн возбуждения в диапазоне 230–320 нм наблюдается только одна полоса флуоресценции (от 320 до 410 нм) с максимумом при 350 нм. При длинах волн регистрации, близких к этому максимуму (от 340 до 380 нм), были получены спектры возбуждения флуоресценции, представленные на рисунке 4 б. Видно, что форма спектров одинаковая, отличия только в интенсивности. Неявные максимумы спектров возбуждения приходятся на 240 и 260 нм, но поскольку спектры регистрации (рис. 4 а) при длинах волн возбуждения 250 и 260 нм практически неразличимы, а спектр при длине волны возбуждения 255 нм даже немного превосходит их по интенсивности, можно именно длину волны 255 нм считать соответствующей максимуму полосы возбуждения флуоресценции. Таким образом, в пробе из водоема № 2 находится примесный компонент, для которого регистрируется полоса флуоресценции с максимумом при 350 нм, а возбуждается она излучением в диапазоне длин волн 230–275 нм с максимумом при 255 нм.

В дополнение к спектральным характеристикам для всех проб были измерены значения pH и электропроводности, а для пробы водоема № 2 дополнительно концентрации железа общего, нитрат-ионов, сульфат-ионов, хлоридов и марганца. Полученные значения представлены в таблицах 1 и 2.

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таблица 1

Значения pH и удельной электропроводности исследуемых проб воды

Показатель	Размерность	Водоем № 1	Водоем № 2	Водоем № 3	Водоем № 4
pH		7,2	3,2	6,6	6,9
Удельная электропроводность	$Ом^{-1}*м^{-1}$	$71,0*10^{-3}$	$165,7*10^{-3}$	$195,0*10^{-3}$	$38,5*10^{-3}$

Выполнено авторами

Таблица 2

Результаты химического анализа пробы воды из водоема № 2

№ п/п	Показатель	Концентрация, $мг/дм^3$	Метод исследования	ПДК*, $мг/дм^3$
1	Железо общее	1,05 ±0,16	Фот., ПНД Ф 14.1:2:4.50-2023	0,3
2	Нитрат-ионы	< 0,1	Фот., ГОСТ 33045-2014 п.9	45
3	Сульфат-ионы	636,7 ±95,5	Турб., ПНД Ф 14.1:2.159-2000	500
4	Хлориды	34,7 ±3,8	Титр., ПНД Ф 14.1:2:3.96-97	350
5	Марганец	0,19 ±0,03	Фот., ГОСТ 4974-2014 п.6.5	6,1

**Примечание: значения предельно допустимой концентрации (ПДК) химических веществ в воде поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования приведены в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21. Выполнено авторами*

Из таблицы 1 следует, что в вода в пробах № 1, 3, 4 — нейтральная, значения pH характерны для поверхностных водных объектов природного происхождения, а в пробе № 2 вода кислая с довольно низким значением pH (3,2). Удельная электропроводность воды природного озера (№ 4) свидетельствует о ее нормальной (невысокой) минерализации, так, к примеру, удельная электропроводность водопроводной воды Санкт-Петербурга примерно равна $10*10^{-3}$ $Ом^{-1}*м^{-1}$ (100 мкСм/см). В остальных объектах вода более минерализована (в 2–4 раза), вместе с тем, в водоеме № 2 электропроводность не является самой высокой. Из данных таблицы 2 также видно, что по основным анионам (сульфатам, хлоридам) воду объекта № 2 нельзя считать сильно минерализованной. Концентрация сульфат-анионов лишь незначительно превышает ПДК (в 1,3 раза). В то же время показатель «железо общее» превосходит ПДК в 3,5 раза, что согласуется с информацией о повышенном содержании железа в кислых шахтных водах (см. Введение).

Таким образом, спектрофотометрический, спектрофлуориметрический и потенциометрический анализ проб воды показал, что воду объектов № 1, 3, 4 по изученным показателям можно отнести к водам природного происхождения, и только кондуктометрический анализ свидетельствовал о большей минерализации воды в объектах 1 и 3, чем в озере природного происхождения (№ 4).

Отличие воды в объекте № 2 было продемонстрировано в данной работе по анализу цвета, абсорбционному спектру (отсутствие РОВ и наличие полосы светопоглощения с максимумом при ~300 нм), по спектрам возбуждения и регистрации флуоресценции (отсутствие примесей белковой и гуминовой природы, наличие полосы регистрации флуоресценции с максимумом при 350 нм, возбуждаемой излучением при 230–275 нм), по кислотности (кислая среда), в результате чего было сделано предположение о том, что водоем № 2 заполнен (или загрязнен) кислыми шахтными водами.

Что касается бирюзового цвета, то в литературе описаны случаи подобного цвета воды, например, в бывшем карьере–озере с pH 3,2, образовавшемся при добыче бурого угля, и он был объяснен наличием в воде медного купороса.[6] Однако чаще всего причиной бирюзового цвета воды называют присутствие в ней коллоидных частиц серы или взвеси минералов, на которых

[6] Кондуки — лазурное побережье Центральной России, но почему здесь такой цвет воды? https://dzen.ru/a/YwtNlF_XQgcJPpo1?ysclid=mec6c0omi1226273203.

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

рассеивается (или от которых отражается) солнечный свет. Объяснение этому явлению дано в разделах коллоидной химии, посвященных оптическим свойствам дисперсных систем. Также в них приведены примеры различной окраски золей металлов в зависимости от их степени дисперсности. Еще одной причиной бирюзового цвета воды может быть цветение определенных видов водорослей. Во Введении со ссылкой на работу [13] отмечалось повышенное содержанием меди, а также Ni, V, Mn, S, в твердых отходах добычи и обогащения каменных углей Печорского угольного бассейна. В ряде других публикаций, названы различные минералы, присутствующие в отвалах угледобычи, а в работе [16] дан подробный анализ аргиллитов Печорского бассейна (а также связанного с ним органического вещества), в том числе, в районе г. Инты. Аргиллиты, о которых идет речь в работе [16] чаще всего имеют серую (синевато-серую) и черную окраску, а при описании изучаемых объектов отмечалось, что водоем № 2 обвалован породой серого цвета.

Полоса поглощения ультрафиолетового (УФ) излучения с максимумом при 300 нм (290–310) в пробе № 2 также может быть вызвана присутствием различных примесей. Так, широко известно, что одна из полос поглощения нитратов (более слабая) находится в диапазоне 280–340 нм с максимумом при 300 нм. Однако, как видно из таблицы 2, в пробе воды № 2 нитраты практически отсутствуют. Можно назвать еще ряд функциональных групп, поглощающих УФ-излучение вблизи 300 нм, но по этим группам у нас пока нет данных химического анализа.

Предположив, что абсорбционный УФ-спектр (рис. 2, кривая 4) и флуориметрические спектры (рис. 4 а, б) относятся к одной и той же примеси, мы провели анализ возможных претендентов с помощью нейросети GigaChat. В качестве наиболее вероятных соединений, которые могут присутствовать в кислых шахтных водах, были названы фенолы и гидрохинон. Рядом литературных источников еще полувековой давности подтверждается возможный максимум поглощения фенолов вблизи 300 нм (точное положение которого зависит от ряда причин), УФ-спектры гидрохинона также зависят от условий анализа, в т. ч., кислотности среды [17]. Аналогичное влияние условий анализа отмечено также в работах по флуоресценции фенолов и гидрохинона, например, [18]. Вместе с тем, в рассмотренных научных статьях не удалось найти информацию о присутствии в кислых шахтных водах фенолов и гидрохинона. В работе [16], в которой проанализировано органическое вещество аргиллитов нижнего карбона Печорского бассейна, названы алканы и изопреноиды и отмечено, что исходное органическое вещество в районе реки Кожим (протекает рядом с Интой) имеет водорослево-микробиальный состав, а в районе рек Верхняя Сочь и Подчерем наблюдается еще и привнос гумусового материала.

Заключение

Таким образом, проведенный в работе физико-химический анализ воды трех водоемов (№ 1, 2, 3), находящихся на территории, техногенно нарушенной в результате функционирования и затем закрытия угольных шахт, показал близость спектральных характеристик и pH воды двух водоемов (№ 1, 3) к показателям воды озера природного происхождения (№ 4) и некоторое превышение удельной электропроводности (в 2–4 раза). В то же время для водоема № 2 показано резкое отличие таких характеристик как цвет воды, спектры поглощения, спектры возбуждения и регистрации флуоресценции, pH, что позволило отнести воду данного водоема к кислым шахтным водам.

На основании полученных результатов мы посчитали целесообразным продолжить изучение других водных объектов вблизи города Инты для выработки рекомендаций по восстановлению качества воды в водоемах, подобных № 2. Как показывает опыт ряда стран, в

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

первую очередь после аэрации можно провести химическую обработку щелочными агентами (такими как известняк, известь, гидроксид натрия, сода, зола, некоторые отходы), осаждение ионов тяжелых металлов, а затем биологическое восстановление. Интересен также опыт использования водно-болотных угодий для фильтрации и очистки кислых шахтных вод, поскольку естественные болота примыкают к исследуемым водоемам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чмыхалова С.В., Гришин В.Ю., Пыталев И.А. Проблемы угледобывающей отрасли, жизненный цикл предприятий по добыче угля и последующая рекультивация нарушенных земель. — http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-1-70-75 // Уголь. — 2023. — № 1. — С. 70–75.
2. Ремезов А.В., Гришин С.С. Экологические проблемы и пути их решения при подземной разработке месторождений полезных ископаемых // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2005. — № 6(51). — С. 38–41.
3. Ремезов А.В., Петрашко А.А. Экологические проблемы при ликвидации угледобывающих предприятий кемеровской области и путь их решения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2004. № 1(38). — С. 54–55.
4. Чмыхалова С.В. Воздействие горнодобывающего предприятия на окружающую среду // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2012. — № 5. — С. 80–84.
5. Говорушко С.М. Экологические проблемы добычи, транспортировки и переработки ископаемого топлива. Владивосток: Дальнаука. — 2014. — 208 с.
6. Chemical composition of groundwater in abandoned coal mines: Evidence of hydrogeochemical evolution / I. Tarasenko, A. Kholodov, A Zin'kov, I. Chekryzhov // Applied Geochemistry. — 2022. — Vol. 137. — P. 105210.
7. Эффективность и рекультивация кислых сульфатных почв в районах угледобычи / Н.В. Митракова, Е.А. Хайрулина, С.М. Блинов, А.А. Перевощикова. — DOI 10.31897/PMI.2023.31 // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 266–278.
8. Akcil A., Koldas S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies Journal of Cleaner Production. — 2006. — Vol. 14. — No. 12–13. P. — 1139–1145.
9. Анализ экологических проблем в угледобывающих регионах / О.М. Зиновьева, Л.А. Колесникова, А.М. Меркулова и др. — DOI: 10.18796/0041-5790-2020-10-62-67 // Уголь. — 2020. — № 10. — С. 62–67.
10. Попова Д.С. Экологические проблемы угледобывающих регионов России // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2017. — № 8 (часть 1) — С. 126–131 URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11773 (дата обращения: 12.07.2025).
11. Чмыхалова С.В., Столярова А.В. Химическое загрязнение окружающей среды угледобывающими предприятиями // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2012. — № 3. — С. 74–84.

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

12. Маглинец Ю.А., Зеньков И.В., Чинь Ле Хунг Исследование накопленного экологического ущерба от добычи угля на участках Печорского каменноугольного бассейна по данным космической съемки. Уголь. — 2024. — № 11. — С. 94–98. — DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11-94-98.

13. Шувалов Ю.В., Нифонтова Т.И., Экгардт В.И. Переработка твердых отходов добычи и обогащения угля печорского бассейна как мера защиты природной среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 7. — С. 95–98.

14. Restoration of Acid Drainage / W. Geller, M. Koschorreck, M. Schultze, K. Wendt-Potthoff. — DOI: 10.13140/2.1.3686.0806 // Encyclopedia of Inland Waters. — 2009. — Vol. 1. — P. 342–358.

15. Molodkina L.M., Sukhareva A.V. Comparative spectral analysis of Gatchina water sources and melted snow as their possible contaminator // IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciencethis link is disabled. — 2022. — 1096(1). — 012013.

16. Рябинкина Н.Н., Валяева О.В. Состав и органическое вещество аргиллитов нижнего карбона Печорского бассейна. — DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/2_2017 // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2017. — Т. 12. — № 1. — 15 с.

17. Пискарев И.М. Цепное окисление гидрохинона водой, активированной импульсным излучением горячей плазмы // Химия высоких энергий. — 2023. — Т. 57. — № 6. — С. 472–477.

18. Fluorescence Investigations of Phenol Phototransformation in Aqueous Solutions / O. Tchaikovskaya, I.V. Sokolova, R.T. Kuznetsova, G.V. Mayer. — DOI: 10.1023/A:1009486615346 // Journal of Fluorescence. — 2000. — No. 10(4). — P. 403–408.

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Molodkina Lyudmila Mikhailovna
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: molodkina.lm@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6056-6618
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=99645
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6603631466

Dudkin Leonard Aleksandrovich
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: dudkinleonard@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1302490

Negulyaeva Ekaterina Yur`evna
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: katnegspb@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5511-2913
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=161102
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56226509200

Comparative analysis of the state of water bodies of technogenic and natural origin in the area of closed coal mining near the city of Inta

Abstract. Coal mining enterprises continue to have a negative impact on the environment after closure. This work is devoted to the study of the state of water bodies at the site of closed coal mines near the city of Inta. The authors studied three reservoirs on a technogenically disturbed territory in comparison with a lake of natural origin. In addition to visual inspection, water samples were analyzed using spectrophotometry, spectrofluorimetry, potentiometry and conductometry. Visual inspection showed that the shores of the lakes on the technogenically disturbed territory were formed to varying degrees by an artificial dike of grey colour, on which a vegetation cover was formed, differing in species diversity, development strength, density and height. We also noted differences in the color of the water in the reservoirs (from brown to turquoise), in the degree of swampiness and bloom. The authors showed that water samples from two studied reservoirs have the same characteristics as water from a natural lake — absorption spectra characteristic of natural waters with dissolved organic substances, spectra of registration and fluorescence excitation characteristic of humic and protein impurities, neutral pH values, but higher electrical conductivity (2–4 times). For the water of the third reservoir, a sharp difference was shown in all characteristics — absorption spectrum (maximum at a wavelength of 300 nm), fluorescence spectra (registration in the band with a maximum at 350 nm, excitation in the range of 240–270 nm), pH value (3,2), electrical conductivity (4 times higher than for natural water), increased content of iron and sulfate ions. This allowed classifying the water of the object as acidic mine water. Measures for restoration of this water body were proposed.

Keywords: coal mining; technogenically disturbed territories; reservoirs; acid mine waters; spectrofluorimetry; spectrophotometry; pH

56NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com