

Химический состав и сорбционная активность сапропелей (обзор)

© 2024. М. Л. Сазанова¹, к. б. н., доцент, н. с.,
А. В. Сазанов², к. б. н., и. о. зав. кафедрой, И. А. Жуйкова², к. г. н., доцент,
Л. В. Тугаринов³, директор по науке,

¹Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

³ООО «ГлавАгроСнаб»,
656067, Россия, г. Барнаул, ул. Попова, д. 208,
e-mail: sazanova.m.l@ib.komisc.ru, usr11759@vyatsu.ru

В последние годы остро стоит вопрос об удалении из окружающей среды либо снижении токсичности поступающих загрязнителей в соответствии с принципами «зелёной химии». «Зелёная утилизация» токсикантов с помощью сорбентов подразумевает использование возобновляемых природных сорбентов с низкой себестоимостью и высокой эффективностью, а также возможность повторного использования сырья. Данным принципам вполне соответствуют пресноводные сапропели. Химический состав сапропелей включает органические и неорганические вещества, преобладание минеральной части определяет тип сапропеля. Состав минеральной части зависит от географического положения, геохимического состава отложений водоёма, химического состава воды, поступающей в озёрную толщу и других факторов. Общее содержание N, P, K, Ca и илистой фракции обуславливает агрохимическую эффективность сапропелей; известковистые сапропели характеризуются наибольшей концентрацией макроэлементов, а органо-кремнезёмистые – наибольшей концентрацией микроэлементов. Сапропели с невысоким содержанием P и K могут быть использованы для производства гуминовых препаратов, мелиорантов и препаратов для детоксикации, ремедиации и рекультивации деградированных и загрязнённых почв. Органическая составляющая сапропелей включает липиды, простые и сложные эфиры, карбоновые кислоты, стеринны, спирты, кетоны, пигменты, углеводороды, порфирины, витамины, ферменты и др., что активно используется в бальнеотерапии. Наличие на поверхности гуминовых веществ в составе сапропелей большого количества азот- и кислородсодержащих функциональных групп обуславливает высокую сорбционную способность. Синтезированные с использованием сапропеля сорбенты эффективны в очистке сточных вод/водных поверхностей от нефти и нефтепродуктов, фенола и других органических загрязнителей, тяжёлых металлов, фторидов, красителей. Широкое распространение сапропелей в пределах водоёмов умеренного пояса, низкая стоимость, достаточно простая технология добычи и применения, наряду с высокими сорбционными свойствами делают перспективным использование этого природного сырья в качестве сорбентов / для производства сорбентов для очищения водоёмов, сточных вод и почв от тяжёлых металлов и нефтяных углеводородов, ремедиации загрязнённых нефтепродуктами и радионуклидами почв.

Ключевые слова: сапропели, сорбенты, гуминовые кислоты, фульвокислоты, «зелёная утилизация», ремедиация.

Chemical composition and sorption activity of sapropels: a review

© 2024. M. L. Sazanova¹ ORCID: 0000-0003-3492-8395, A. V. Sazanov² ORCID: 0000-0002-6934-3330,
I. A. Zhuikova² ORCID: 0000-0001-7855-604X, L. V. Tugarinov³ ORCID: 0009-0001-5523-3683

¹Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

³GlavAgroSnab Ltd,

208, Popova St., Barnaul, Russia, 656067,

e-mail: sazanova.m.l@ib.komisc.ru, usr11759@vyatsu.ru

Recently the removing from the environment or reducing the toxicity of pollutants in accordance with the principles of “green chemistry” is acute. “Green utilization” of toxicants by means of sorbents implies the use of renewable natural sorbents with low cost and high efficiency, as well as the possibility of raw materials reuse. Freshwater sapropels meet these principles quite well. The sapropels include organic and inorganic substances, the predominance of the mineral part determines the sapropel type. The composition of the mineral part depends on the geographical location, geochemical composition of the reservoir sediments, chemical composition of water entering the lake bed and other factors. The N, P, K, Ca and silt fraction total content determines the agrochemical efficiency of sapropels; calcareous sapropels are characterized by the highest concentration of macroelements, and organic-silica sapropels – by the highest concentration of trace elements. Sapropels with P and K low content can be used for production of humic preparations, ameliorants and preparations for detoxification, remediation and recultivation of degraded and polluted soils. The organic component of sapropels includes lipids, simple and esters, carboxylic acids, sterols, alcohols, ketones, pigments, hydrocarbons, porphyrins, vitamins, enzymes, etc., which is actively used in balneotherapy. The presence of a large number of nitrogen- and oxygen-containing functional groups on the surface of humic substances in sapropel is responsible for high sorption capacity. The sorbents synthesized using sapropel are effective in wastewater/water surface treatment from oil and oil products, phenol and other organic pollutants, heavy metals, fluorides, dyes. The wide distribution of sapropels within the temperate zone water bodies, low cost, simple enough technology of extraction and application, along with high sorption properties make it promising to use this natural raw material as sorbents / for the production of sorbents for purification of water bodies, wastewater and soils from heavy metals and petroleum hydrocarbons, remediation of soils contaminated with petroleum products and radionuclides.

Keywords: sapropel, sorbent, humic acids, fulvic acids, “green utilization”, remediation.

В связи с поступлением в окружающую среду большого количества загрязнителей остро встаёт вопрос об их удалении либо снижении токсичности уже поступивших в биосферу. С этой задачей неплохо справляются различные природные и искусственные сорбенты; в пользу первых свидетельствует их соответствие принципам «зелёной утилизации»: низкая себестоимость, высокая эффективность, возобновляемость, возможность использования в качестве мелиорантов и т. п. [1]. В настоящее время известно достаточно большое количество природных сорбентов, к которым относят горные породы и минералы, обладающие высокими адсорбционными и (или) ионообменными свойствами: природные цеолиты, бентонитовые и палыгорскитовые глины, диатомиты, сапропели, опоки, трепелы и др. Благодаря высокой пористости, молекулярно-ситовым свойствам и кислотоустойчивости их используют в промышленности в качестве осушителей и очистителей промышленных газов и вод; в сельском хозяйстве в качестве биостимулирующих кормовых добавок, кондиционирующих материалов при подготовке удобрений, пролонгаторов и т. д. Активно используются сорбенты и в природоохранных мероприятиях (очистка промышленных газов, дезактивация почв от токсичных примесей, очистка водоёмов от загрязнителей, рекультивация и др.) [2–5].

Образовавшиеся на дне озёр в течение тысяч лет в результате микробиологических, биохимических и механических процессов органо-минеральные отложения, содержащие свыше 15 % (по массе) органических веществ, называются сапропелями [6–9]. В литературе

также можно встретить название гиттия (шв. *gyttja*, букв. иловая грязь) [10–15], имеет то же значение – «ил», «тина», «вещество, образующееся на дне водоёмов». Наиболее интенсивное образование и накопление сапропеля характерно для умеренных климатических зон Евразии и Северной Америки [7, 13]. Так, в России запасы сапропеля оцениваются в 250 млрд м³ [9], в Белоруссии – 4 млрд м³ [16], в Литве – 1,5 млрд м³ [17, 18], в Латвии – 0,7–2 млрд м³ [15; 19], в Украине – 86 млн т [20]; запасы сапропеля в Западной Европе (Великобритания, Германия, Польша, Румыния, Франция, скандинавские страны) существенно истощены [8]. Изучались также сапропелевые отложения в озёрах Африки [21], а также озёрах на месте закрытых шахт по разработке бурого угля и глины [12].

Цель работы – систематизировать и критически оценить мировой опыт и перспективные научные разработки в сфере применения сапропелей и продуктов на их основе в качестве сорбентов, в том числе для ремедиации загрязнённых сред.

Объекты и методы исследования

Статья представляет собой обзор, направленный на структурирование, критический анализ и обобщение опубликованных данных по рассматриваемой проблеме. Базу обзорной статьи составляют результаты научных исследований, посвящённых вопросам химического строения и сорбционных свойств сапропелей, за период с 2000 по 2024 гг. Для поиска источников научной и технической информации использовали сервисы PubMed, Scopus, Web

of Science, Google Scholar, eLIBRARY, Академия Google, ИС «Поисковая платформа» Роспатента. Подбор публикаций проводили по таким ключевым словам (в русскоязычном и англоязычном вариантах), как сапропель, донные отложения, сорбент, фульвокислоты, гуминовые кислоты, «зелёная утилизация», а также по ключевым словам из научных статей аналогичной тематики.

Химический состав сапропелей

Сапропели представляют собой сложный органоминеральный комплекс, формирующийся под влиянием многих факторов, поэтому химический состав сапропеля зависит от условий формирования и изначальной совокупности органических и минеральных компонентов. Согласно [7], классификация сапропелей должна строиться с учётом содержания органического вещества (ОВ), а также состава минеральных и органических компонентов, однако существующие классификации не отличаются достаточной полнотой и универсальностью. Наиболее полной считается генетическая классификация сапропелей с учётом содержания ОВ, степени его разложения, минеральной составляющей, содержания остатков микроорганизмов [6]. Промышленно-генетическая классификация сапропелей строится с учётом их зольности [22]. Преобладание минеральной составляющей определяет железистый, кремнезёмистый (25–45% кремнезёма), карбонатный/известковистый (30–60% карбоната кальция), органический (50–90% ОВ) типы сапропеля; существует несколько видов каждого типа; основной тип определяется биологическим и оксидным содержанием [23, 24]. В пределах одного водоёма, как правило, представлены разные типы сапропеля. Например, в озере Кирек (Томская область) на мелководных участках сформировался известковистый сапропель за счёт разложения биомассы макрофитов, на больших глубинах – органический-железистый сапропель за счёт отмирания биомассы фито- и зоопланктона, на переходных глубинах (3,5–4,5 м) – сапропель смешанного генезиса [25].

Большое количество работ посвящено изучению содержания макро- и микроэлементов в составе сапропелей. Элементный состав сапропелей включает все незаменимые макро- и микроэлементы: N, P, K, S, Ca, Fe, Mg, Cu, Mn, Na, Zn, Co, B, I и др. [13, 14, 23, 25–39]. Согласно [34], состав минеральной части пре-

сноводных сапропелей находится в прямой зависимости от географического положения и геохимического состава отложений региона; условий формирования и возраста озёрной толщи; химического состава воды, поступающей в озёрную котловину; химического состава гидробионтов и околотоводных организмов.

Согласно [40], общее содержание N, P, K, равно как содержание Ca и илистой фракции, обуславливает агрохимическую эффективность сапропелей. Сравнительно невысокое содержание P и K в сапропелях ряда месторождений [30, 37, 39] снижает эффективность удобрений на основе нативного сапропеля; для компенсации дефицита органогеенов рекомендуется смешивание сапропеля с навозом или обогащение минеральными удобрениями [9]. Другим вариантом является производство гуминовых препаратов, которые в значительной степени наследуют свойства гуминовой фракции сапропелей [41], являются нетоксичными по результатам биотестирования [41, 42], и могут использоваться в качестве стимуляторов роста растений [43, 44], а также мелиорантов и препаратов для детоксикации, ремедиации и рекультивации деградированных и загрязнённых почв [2, 3, 45, 46–48].

Установлено, что содержание химических элементов в сапропелях различного типа отличается как от почвенных кларков, так и от среднего по сапропелям в целом. Так, известковистые сапропели характеризуются наибольшей концентрацией макроэлементов, а органико-кремнезёмистые сапропели – наибольшей концентрацией микроэлементов [14], что важно учитывать при производстве удобрений, кормовых добавок и др. По данным [34], концентрация Co, B, Cr, Mo/Zn/Cu и V в широко распространённых органико-кремнезёмистых сапропелях, соответственно, в 4, 2–7, 2–5, 2–4 и 2 раза выше, чем в среднем в почвах мира, в связи с чем сапропели и продукты на их основе служат источником обогащения кормов микроэлементами [28, 49]. Установлено, что химические элементы относительно равномерно распределены по сапропелевому слою [23, 25, 33, 50]. P, Br, Zn, Ca, Na в составе сапропелей имеют преимущественно «планктонное» происхождение (биогенный вклад 30–100%) [29, 33].

По данным российских исследователей образцов сапропелей из различных месторождений [23, 34, 37–39], содержание тяжёлых металлов (ТМ) находится в нормативных пределах и соответствует требованиям безопасности (ГОСТ 54000-2010 и т.п.). Для Sr

и Ва биогенный вклад оценивается в 30%, для Cd, Cu, K, Mg, Sr в 16–26%, причём по многим элементам, в том числе ТМ (за исключением Mn), планктонный вклад заметно превосходит растительный [29]. Высокое содержание подвижных форм Cd, Sb, Sn, Pb и Zn в верхних горизонтах сапропеля может быть обусловлено антропогенными факторами: лесные пожары, влияние выбросов автотранспорта, ТЭС и др. [23, 25, 33, 36, 51, 52]; кроме того, способность макрофитов аккумулировать ТМ из воды способствует их накоплению в донных отложениях после отмирания растений [53]. Редкоземельные элементы – Sc, Ce, Y, La, Th и др. – накапливаются преимущественно в негидролизуемом остатке [27, 35]. Rb, Sc, Zr, Nb, лантаноиды, Hf и Th в составе сапропеля считаются исключительно терригенными элементами (биогенный вклад <1%) [29; 33].

Основными источниками ОБ сапропелей являются зоо- и фитопланктон, концентрирующие в основном органогены, а также некоторые щелочные, щелочноземельные и халькофильные элементы и перемещающие их в осадки [33]. Методом последовательной экстракции в составе ОБ сапропелей выделяются следующие фракции: кислоторастворимые (карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов); водорастворимые (пектиновые вещества, моно- и дисахариды и др.); битумы, растворимые в спирт-бензольной смеси (липиды, фенолы, соединения пиридинового ряда, алифатические углеводороды и др.); гуминовые и фульвовые кислоты; легкогидролизуемые (полисахариды); трудногидролизуемые (целлюлоза) и негидролизуемый остаток (гумин и нерастворимые минералы) [54]. Более детальный анализ позволяет идентифицировать липиды, простые и сложные эфиры, карбоновые кислоты, стерины, спирты, кетоны, пигменты, углеводороды, порфирины, витамины (тиамин, рибофлавин, фолиевая кислота, цианкобаламин, токоферол, пиридоксин, аскорбиновая кислота), ферменты (каталаза, пероксидаза, редуктаза, протеаза, уреаза и ксантиноксидаза), антибиотики и др. [26, 28, 32, 55–57]. Особое значение имеют гуминовые вещества, включающие гуминовые, гиматомелановые и фульвокислоты, обогащённые ионизируемыми функциональными группами (карбокисильными и фенольными), содержащие гетероциклический и амидный азот и, как следствие, наиболее реакционно-способные [58].

Фульвокислотная фракция сапропелей имеет невысокую молекулярную массу, со-

держит большое количество кислородсодержащих (карбонильных, карбокисильных) групп. Методом тонкослойной хроматографии в составе ФК были качественно идентифицированы аминокислоты, углеводы, карбоновые кислоты [56]. Фракция карбоновых кислот включает насыщенные монокарбоновые (арахиновая, бегеновая, капроновая, лигноцериновая, миристиновая, пальмитиновая, пировиноградная, стеариновая, церотиновая), ди- и трикарбоновые (адипиновая, азелаиновая, винная, лимонная, малоновая, метилантарная, пимелиновая, щавелевая, яблочная, янтарная), ненасыщенные (линолевая, линоленовая, олеиновая), ароматические (бензойная, ванилиновая, галловая, гентизиновая, *n*-кумаровая, салициловая, сиреневая, терефталевая, феруловая, фталевая) кислоты [55, 56, 59]. Углеводный пул состоит из D-глюкозы, D-галактозы, L-рамнозы, арабинозы, ксилозы, лактозы, мальтозы, раффинозы, целлобиозы [54–56], причём планктоногенный сапрпель содержит значительно меньшее количество глюкозы и целлобиозы, чем макрофитогенный [54]. Аминокислотный комплекс представлен глутаминовой кислотой, треонином, лейцином, аспарагиновой кислотой, фенилаланином, тирозином, гистидином, цистеином, изолейцином, лизином, глицином, аспарагином, аргинином, серином, валином, L- α -аланином, глутамином, триптофаном, метионином [28, 32, 55], что указывает на органическую природу азота сапропелей. Концентрация аминокислот зависит от источника и глубины отбора проб сапропеля [28].

Во фракции гуминовых кислот, по результатам термического анализа [60], преобладают алифатические фрагменты по сравнению с циклическими. По данным ИК-спектрограмм для гуминовых кислот характерно наличие групп –ОН, –NH, –C=O, –COOH, в т. ч. связанных межмолекулярными водородными связями, алифатических –CH₂– и –CH₃ и хиноидных фрагментов, группировок C=C ароматического скелета и многоядерных структур, пептидных связей [56, 60]. Гиматомелановые кислоты сапропелей имеют меньшее значение молекулярной массы, большее содержание алифатических, алициклических и гидроароматических структур, карбокисильных и сложноэфирных групп [56]. Таким образом, согласно современным представлениям [58], гуминовые вещества являются надмолекулярными ансамблями небольших молекул (2–6 кДа), стабилизированных дисперсионными взаимодействиями и водородными связями.

Разнообразие ОВ в составе сапропеля косвенно свидетельствует об активной микробиологической деятельности. В верхнем пятисантиметровом слое в сапропеле снижается количество типичных для продуцентов белково-углеводных соединений; глубже ОВ модифицируются бактериями в анаэробных условиях. Для верхних горизонтов – активных (деятельных) слоёв сапропеля – характерно максимальное обилие аммонифицирующих бактерий, которые участвуют в разложении азотсодержащих органических соединений; с глубиной увеличивается количество сульфатредуцирующих бактерий [50]. В сапропеле сульфатно-солонатоводных водоёмов основной вклад в численность сообщества вносят сульфатредуцирующие и броидильные бактерии [61].

Сорбционная активность сапропелей

Решению задач снижения потребления природных ресурсов и загрязнения окружающей среды способствует создание инновационных строительных и композиционных материалов с использованием возобновляемого сырья, в частности сапропеля, в качестве связующей основы [62–64], а также сорбентов для очистки от загрязнителей сточных вод и почв [3, 65], нефти и нефтепродуктов от примесей [66], ремедиации загрязнённых нефтепродуктами и радионуклидами почв [2, 45–47]. В отношении достоинств и недостатков сорбентов на основе сапропеля отсутствует единое мнение: с одной стороны указывают на экологическую чистоту, высокую гидрофобность и простоту утилизации отработанного сорбента путём сжигания [3], с другой – отмечают наличие большого количества пыли, минеральных веществ и токсичных органических соединений [67]. Тем не менее, сапрпель, наряду с леонардитом и торфом, входит в тройку основных природных источников для промышленного производства гуминовых кислот [2], которые и определяют сорбционные свойства углеродных/углерод-минеральных материалов на основе сапропеля.

По мнению ряда авторов [5, 60], сорбционные свойства сапропелей связаны, прежде всего, с гуминовыми и фульвовыми кислотами в их составе. Наличие большого количества азот- и кислородсодержащих функциональных групп на их поверхности, в т. ч. отрицательно заряженных, обуславливает высокую сорбционную способность. В частности, механизмы взаимодействия

фульвокислот с металлами включают адсорбцию, хелатирование, окислительно-восстановительные реакции и, как следствие, изменение морфологии, подвижности, токсичности и биодоступности металлов в естественной среде [5]. По данным [68], гуминовые вещества из разных климатических зон обладают разным сорбционным сродством к токсикантам, что следует учитывать при разработке сорбентов на основе гуминовых веществ.

Установлено, что сорбенты, синтезированные с использованием сапропеля, эффективны в очистке сточных вод/водных поверхностей от нефти и нефтепродуктов [69–72], фенола и других органических загрязнителей [70, 73, 74], тяжёлых металлов – Pb [17, 70, 75], Ni [65, 69, 70], Cu [70, 76, 77], Zn [69, 70, 75], Cr [69, 70] и др., фторидов [17], красителей [70, 77].

Наилучшими сорбционными характеристиками в отношении ионов металлов обладают сорбенты, полученные термической карбонизацией сапропелей [70, 73]. Так, карбонизация при 600 °С в окислительной среде смеси 100:5 сапрпель:бентонит позволяет синтезировать углеродно-минеральный сорбент, который активно поглощает ионы Cu^{2+} , иод и метиловый оранжевый из природных и сточных вод и, следовательно, пригоден для их очистки [77]. Однако, по данным [17], сапрпель не адсорбирует нитраты из водных растворов. Карбонатный и кремнезёмистый сапропели могут быть использованы в качестве активаторов алюмосиликатных сорбентов для эффективного обесцвечивания высокоцветных поверхностных природных вод [78].

В настоящее время углеродородное загрязнение почв считается одним из самых крупномасштабных. Нефть и нефтепродукты содержат вещества канцерогенного, тератогенного и мутагенного действия, которые могут нанести серьёзный ущерб окружающей среде, в связи с чем ремедиация нефтезагрязнённых почв является приоритетной экологической задачей, особенно актуальной в странах с активной нефтедобычей [3, 46, 79]. Ремедиация загрязнённых нефтью почв осуществляется с помощью механических, физико-химических и биологических методов. Несмотря на определённые недостатки физико-химических методов (необходимость утилизации использованных сорбентов и др.), они активно используются для восстановления почв. В качестве нефтепоглощающих сорбентов описаны нативные и модифицированные минеральные порошки (глина, кремнезём, диа-

томит, керамзит, перлит, вермикулит, доломит и др.), углеродные сорбенты (активированный уголь, сапропель, бурый и каменный уголь, карбонизат и др.), сорбенты на основе растительного сырья (торф, лигнин, целлюлоза, мох, рисовая/гречневая шелуха, пшеничные отруби, высушенные початки кукурузы, солома, опилки, древесная стружка, сосновая кора, шерсть и др.), синтетические (полипропилен, полиуретан, формованный полиэтилен с полимерными наполнителями, каучуковая крошка, синтепон и др.) и биосорбенты – носители микроорганизмов-деструкторов [3, 46, 47, 80–82].

Так, установлено, что сорбент на основе гидролизного лигнина и кремнезёмного сапропеля ускоряет биodeградацию углеводородов нефти в почве [72, 83].

Для модификации текстуры углерод-минеральных материалов из карбонизированных сапропелей применяется обработка водяным паром: сокращается число макропор и увеличивается количество мезо- и микропор [83].

Извлечённые из сапропеля гуминовые вещества также могут быть использованы в качестве сорбентов на нефтезагрязнённых почвах. В литературе представлено много работ, в которых оценены сорбирующая способность по отношению к нефтяным углеводородам гуминовых веществ, извлечённых из торфа [84], бурого угля/леонардита [85–87], либо источник гуминовых веществ не указан. В частности, установлено стимулирующее действие извлечённого из бурого угля гумата калия на деструкцию нефтяных углеводородов и биологическую активность местной нефте-разлагающей микробиоты чернозёмов при любом уровне нефтяного загрязнения [88].

Кроме того, гуматы различного происхождения могут быть использованы в качестве промывочных агентов нефтезагрязнённых почв, снижая сорбцию нефтяных углеводородов и ГМ на почвенных частицах, стимулируя развитие углеводород-окисляющей микробиоты почв, а также для стимуляции биохимического окисления нефти [89, 90].

Перспективным направлением ремедиации нефтезагрязнённых почвенных экосистем и техногенных грунтов является использование биосорбентов, в которых в качестве матрицы используется сапропель и другие природные (керамзит, силикагель, перлит, бентонит, торф, агар, агароза, каррагинан, коллаген, альгинат натрия, хитозан, целлюлоза) или химические материалы (полиуретан, тефлон, полипропи-

лен, полиакриламид, фенолформальдегидные пены) [91, 92]. Так, при использовании комбинированного мелиоранта, состоящего из известкового сапропеля, обработанного биопрепаратом серии «Нафтокс» на основе аэробных углеводородокисляющих бактерий рода *Pseudomonas*, снижение содержания нефтепродуктов в дерново-подзолистой почве за 90 сут модельного эксперимента составило 86–88 % [93]. Биоремедиация экономически эффективна в регионах с оптимальной влажностью для плодородных почв, однако в условиях экстремальных температур, высокой инсоляции, повышенной солёности среды и низкой влажности её применение может быть ограничено [94].

Кроме того, сапропель пригоден для ремедиации загрязнённых радионуклидами почв; при его внесении радионуклиды активно сорбируются, а их миграция из почвы в растение снижается [45, 95]. Установлена прочная фиксация радионуклидов (^{90}Sr , ^{90}Y , ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{238}U , ^{239}Pu) сорбентом на основе гидролизного лигнина и кремнезёмистого сапропеля [72].

Макропористые углерод-минеральные материалы из карбонизированных сапропелей рассматриваются также в качестве простых и доступных носителей катализаторов (**Fe, Ni, Co, Mo**), причём их кислотная обработка приводит к увеличению числа поверхностных функциональных кислородсодержащих групп и способствует стабилизации нанесённых металлов в высокодисперсном состоянии [83].

Заключение

Сапропели, используемые в качестве сорбентов для «зелёной утилизации» поступающих в окружающую среду токсикантов, относятся к возобновляемым природным ресурсам, имеют низкую себестоимость, высокую эффективность, возможность повторного использования в качестве мелиорантов. Несмотря на то, что сапропели из различных озёр умеренного пояса весьма значительно отличаются по химическому составу и свойствам, тем не менее, имеют общие черты: относительно высокое содержание органического вещества (более 15%), богатый макро- и микроэлементный состав. Анализ физико-химических свойств и состава органической и минеральной части сапропелей позволяет отнести их к весьма ценному природному сырью многоцелевого назначения: удобрения и мелиоранты в сельском хозяйстве, сырьё для производства гуминовых

препаратов, биологически активных добавок, сорбентов, строительных и композиционных материалов и т. д.

Широкое распространение сапропелей в пределах водоёмов умеренного пояса, низкая стоимость, достаточно простая технология добычи и применения, наряду с достаточно высокими сорбционными свойствами делают перспективным использование этого природного сырья в качестве сорбентов / для производства сорбентов для очищения водоёмов, сточных вод и почв от тяжёлых металлов и нефтяных углеводородов, ремедиации загрязнённых нефтепродуктами и радионуклидами почв.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 122040100032-5.

References

1. Yurak V.V., Apakashev R.A., Lebzin M.S., Malyshev A.N. Composite sorbents from natural and man-made raw materials: optimization of composition for reclamation // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. 12-1. P. 177–191 (in Russian). doi: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_177
2. Zagrebin E.M., Sosnov A.V., Sadovnikov S.V., Zemlyakova M.A., Putykin Y.G., Shapovalov A.A. New high-tech sorbents and sorbents-bio-destructors based on humic acids as remediation and remediation of contaminated soils // Theoretical and Applied Ecology. 2012. No. 4. P. 21–29 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-029-037
3. Lisichkin G.V., Kulakova I.I. Elimination of emergency oil spills: state and problems (review) // Russian Journal of Applied Chemistry. 2022. V. 95. No. 9. P. 1082–1110 (in Russian) doi: 10.31857/S0044461822090018
4. Chaplina T.O., Pakhnenko V.P. Peculiarities of surface water purification from hydrocarbons using natural sorbents // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 38–44. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-038-044
5. Song C., Sun S., Wang J., Gao Y., Yu G., Li Y., Liu Z., Zhang W., Zhou L. Applying fulvic acid for sediment metals remediation: Mechanism, factors, and prospect // Front. Microbiol. 2023. V. 13. Article No. 1084097. doi: 10.3389/fmicb.2022.1084097
6. Rubinshtein A.Ya. Biogenic soils. Moskva: Nauka, 1986. 87 p. (in Russian).
7. Shtin S.M. Lake sapropels and their complex development / Ed. I.M. Yaltants. Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2005. 373 p. (in Russian).
8. Krivonos O.I., Belskaya O.B. A new waste-free integrated approach for sapropel processing using supercritical fluid extraction // J. Supercrit. Fluids. 2020. V. 166. Article No. 104991. doi: 10.1016/j.supflu.2020.104991
9. Anisimova T.Yu. Use of peat and sapropel resources in agriculture of non-chernozem zone of Russia: status of the issue and prospects // Problems of agrochemistry and ecology. 2022. No. 1. P. 51–58 (in Russian). doi: 10.26178/AE.2022.76.68.004
10. Starink M., Bär-Gilissen M.J., Bak R.P., Cappenberg T.E. Quantitative centrifugation to extract benthic protozoa from freshwater sediments // Appl. Environ. Microbiol. 1994. V. 60. No. 1. P. 167–173. doi: 10.1128/aem.60.1.167-173.1994
11. Gašiorowski M., Sienkiewicz E. The sources of carbon and nitrogen in mountain lakes and the role of human activity in their modification determined by tracking stable isotope composition // Water Air Soil Pollut. 2013. V. 224. No. 4. Article No. 1498. doi: 10.1007/s11270-013-1498-0
12. Gašiorowski M., Stiens J., Sienkiewicz E., Sekudewicz I. Geochemical variability of surface sediment in post-mining lakes located in the Muskau Arch (Poland) and its relation to water chemistry // Water Air Soil Pollut. 2021. V. 232. Article No. 108. doi: 10.1007/s11270-021-05057-8
13. Stankevica K., Vincevica-Gaile Z., Klavins M. Freshwater sapropel (gyttja): its description, properties and opportunities of use in contemporary agriculture // Agronomy Research. 2016. V. 14. No. 3. P. 929–947.
14. Vincevica-Gaile Z., Stankevica K. Impact of micro- and macroelement content on potential use of freshwater sediments (gyttja) derived from lakes of eastern Latvia // Environ. Geochem. Health. 2018. V. 40. No. 5. P. 1725–1738. doi: 10.1007/s10653-017-9912-y
15. Vanadziņš I., Mārtiņšone I., Kļaviņa A., Komarovska L., Auce A., Dobkeviča L., Sprūdža D. Sapropel – mining characteristics and potential use in medicine // Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences. 2022. V. 76. No. 2. P. 188–197. doi: 10.2478/prolas-2022-0029
16. Kurzo B.V., Makarenko T.I., Hajdukiewicz O.M. Opportunities of the joint development of peat and sapropel deposits for agricultural in Belarus // Trudy Instorfa. 2019. No. 19 (72). P. 26–32 (in Russian).
17. Albrektienė-Plačakė R., Bakšienė K., Gargasas J. Investigation on applying biodegradable material for removal of various substances (fluorides, nitrates and lead) from water // Materials. 2023. V. 16. Article No. 6519. doi: 10.3390/ma16196519
18. Bakšienė E., Ciūnys A. Dredging of lake and application of sapropel for improvement of light soil properties // J. Environ. Eng. Landscape Manage. 2012. V. 20. No. 2. P. 97–103. doi: 10.3846/16486897.2011.645824
19. Stankeviča K., Kļaviņš M. Sapropelis un tā izmantošanas iespējas // Materials Science and Applied Chemistry. 2013. V. 29. P. 109–126. doi: 10.7250/msac.2013.028
20. Topachevskiy I.V. Sapropels of freshwater reservoirs of Ukraine // Geologiya i poleznye iskopaemye mirovogo okeana. 2011. No. 1. P. 66–72 (in Russian).

21. Kamulali T.M., McGlue M.M., Stone J.R., Goodman P.J., Cohen A.S. Paleocological analysis of Holocene sediment cores from the southern basin of Lake Tanganyika: implications for the future of the fishery in one of Africa's largest lakes // *J. Paleolimnol.* 2022. V. 67. P. 17–34. doi: 10.1007/s10933-021-00219-4
22. Minakovskiy A.F., Ignatovets O.S., Shatilo V.I., Sergievich D. S., Bosak V.N. Characteristics and prospects of using different types of sapropel // *Technological aspects of cultivation of agricultural crops: sbornik statey XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchenoy 100-letiyu kafedry zemledeliya*. Gorki: BGSKhA, 2020. P. 105–107 (in Russian).
23. Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A., Krivonogov S.K. Geochemistry of Holocene sapropels from small lakes of the southern Western Siberia and eastern Baikal regions. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2019. 444 p. (in Russian). doi: 10.21782/B978-5-6041446-9-5
24. Mostovich E.A. Status and prospects of sapropel use and production // *Moscow Economic Journal*. 2020. No. 8. P. 116–125 (in Russian). doi: 10.24411/2413-046X-2020-10591
25. Bobrov V.A., Leonova G.A., Orlova L.A., Krivonogov S.K., Fedorin M.A., Markova Y.N. Investigation into the elemental composition of sapropel from Lake Kirek (West Siberia) by SR XFA technique // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2012. V. 6. No. 3. P. 458–463. doi: 10.1134/S1027451012050072
26. Georgievskiy V.I., Shevelev N.S., Khorolskiy A.A., Mitin B.E., Nikitin E.M., Ulasevich T.P. Chemical composition of sapropels of different deposits and the possibility of their use in livestock // *Izvestiya TSKhA*. 1988. No. 2. P. 155–161 (in Russian).
27. Adeeva L.N., Kovalenko T.A., Krivonos O.I., Plaksin G.V., Strunina N.N. Determination of the chemical composition of sapropel // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2009. V. 52. No. 3. P. 121–123 (in Russian).
28. Eliseev A.N., Baguta M.Yu., Belova S.S., Stepanov A.A. Chemical composition and biological properties of sapropel // *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2011. No. 1. P. 65–67 (in Russian).
29. Leonova G.A., Bobrov V.A., Lazareva E.V., Bogush A.A., Krivonogov S.K. Biogenic contribution of minor elements to organic matter of recent lacustrine sapropels (Lake Kirek as example) // *Lithol. Miner. Resour.* 2011. V. 46. P. 99–114. doi: 10.1134/S0024490211010044
30. Strakhovenko V.D., Taran O.P., Ermolaeva N.I. Geochemical characteristics of the sapropel sediments of small lakes in the Ob'-Irtys interfluvies // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55. No. 10. P. 1160–1169. doi: 10.1016/j.rgg.2014.09.002
31. Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., Ievins G. Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growth-affecting activity and cultivable microorganism content // *Zemdirbyste-Agriculture*. 2014. V. 101. No. 4. P. 355–366. doi: 10.13080/z-a.2014.101.045
32. Agafonova L., Alsina I., Sokolov G., Kovrik S., Bambalov N., Apse J., Rak M. New kinds of sapropel and peat based fertilizers // *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*. 2015. V. 2. P. 20–26. doi: 10.17770/etr2015vol2.271.
33. Leonova G.A., Bobrov V.A., Krivonogov S.K., Bogush A.A., Bychinskii V.A., Mal'tsev A.E., Anoshin G.N. Biogeochemical specifics of sapropel formation in Cisbaikalian un-drained lakes (exemplified by Lake Ochki) // *Russ. Geol. Geophys.* 2015. V. 56. No. 5. P. 745–761. doi: 10.1016/j.rgg.2015.04.006
34. Uspenskaya O.N., Vasyuchkov I.Yu. Trace elements in sapropel – natural fertilizer material for organic farming // *Agrochemistry*. 2019. No. 10. P. 52–57 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188119100132
35. Baricz A., Levei E.A., Şenilă M., Pînzaru S.C., Aluș M., Vulpoi A., Filip C., Tripon C., Dădârlat D., Buda D.M., Dulf F.V., Pinteă A., Cristea A., Muntean V., Keresztes Z.G., Alexe M., Banciu H.L. Comprehensive mineralogical and physicochemical characterization of recent sapropels from Romanian saline lakes for potential use in pelotherapy // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. Article No. 18633. doi: 10.1038/s41598-021-97904-1
36. Bogush A.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., Bychinsky V.A., Bobrov V.A., Maltsev A.E., Tikhova V.D., Miroshnichenko L.V., Kondratyeva L.M., Kuzmina A.E. Biogeochemistry and element speciation in sapropel from freshwater Lake Dukhovoe (East Baikal region, Russia) // *Appl. Geochem.* 2022. V. 143. Article No. 105384. doi: 10.1016/j.apgeochem.2022.105384
37. Zhirkov I.I., Trofimova T.P., Yakutsk, Russia Sapropel resources of Lake Kubalakh, Yakutsk // *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2022. No. 2 (26). P. 39–46 (in Russian). doi: 10.25587/SVFU.2022.26.2.005
38. Sleptsova T.V., Abramov A.F. Assessing sapropel raw materials from lake deposits of the Sakha Republic Kobyai ulus (Yakutia) and its prospects use in agricultural production // *Bulliten KrasSAU*. 2022. No. 7. P. 46–51 (in Russian). doi: 10.36718/1819-4036-2022-7-46-51
39. Sazanov A.V., Sazanova M.L., Zhuikova I.A., Tugarinov L.V. Chemical composition assessment of sapropels from different deposits // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 2. P. 108–116 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-2-108-116
40. Kostenkov N.M. Ecological and Agrochemical estimate of sedimentary deposits of lakes on marine terraces of coast Sea of Japan // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 2. P. 30–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-030-034
41. Yakimenko O.S., Terekhova V.A. Humic preparations and the assessment of their biological activity for certification purposes // *Eurasian Soil Sci.* 2011. V. 44. No. 11. P. 1222–1230. doi: 10.1134/S1064229311090183

42. Fedoseeva E.V., Terekhova V.A., Yakimenko O.S., Gladkova M.M. Ecotoxicological evaluation of commercial humates of different origin using microalgae *Scenedesmus quadricauda* // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 4. P. 45–49 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-045-049
43. Loskutov S.I., Pukhalsky Y.V., Mityukov A.S. Vorobyov N.I., Glushakov R.I. Effect of various fractions of an ultradispersed humate-sapropel suspension on the growth, development, and quality of basil (*Ocimum basilicum* L.) plants as compared to the use of chemical fertilizers // Russ. Agricult. Sci. 2023. V. 49. P. 627–633. doi: 10.3103/S1068367423060125
44. Rumyantsev V.A., Pukhalskii Ya.V., Loskutov S.I., Mityukov A.S., Vorob'yov N.I., Yakubovskaya A.I., Kameneva I.A., Nikiticheva G.V., Gorodnova L.A., Berdysheva K.N., Kovalchuk A.I., Meshcheryakov D.D. Use of a humate-sapropelic suspension when growing sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) in protected soil conditions (greenhouse) // Dokl. Earth Sci. 2024. V. 516. P. 774–780. doi: 10.1134/S1028334X24600865
45. Konoplev A.V., Popov V.E., Maskalchuk L.N. Development of amendments for rehabilitation of soils, contaminated by radionuclides, and assessment of their application efficacy // Radioprotection. 2009. V. 44. No. 5. P. 135–139. doi: 10.1051/radiopro/20095029
46. Vasileva G.K., Strizhakova E.R., Bocharnikova E.A., Semenyuk N.N., Yatsenko V.S., Slyusarevskiy A.V., Baryshnikova E.A. Oil and petroleum products as soil pollutants. Technology of combined physical and biological treatment of contaminated soils // Rossiyskiy khimicheskii zhurnal. 2013. V. 57. No. 1. P. 79–104 (in Russian).
47. Zabolotskikh V.V., Tankih S.N., Vasilyev A.V. Technological approaches to detoxify and restore contaminated land // Izvestia of RAS SamSC. 2018. V. 20. No. 5-3 (85). P. 341–351 (in Russian).
48. Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Zubkova T.A. Novel methodological approaches to the study of sorbents in soils polluted with heavy metals // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 2019. V. 74. P. 118–122. doi: 10.3103/S0147687419030062
49. Grigorev M., Grigoreva A., Sharvadze R., Chernogradskaya N., Stepanova S. The effectiveness of unconventional feed additives at feeding cattle in conditions Yakutia // Interagromash 2022: Proceedings of XV International Scientific Conference. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham, 2023. V. 574. P. 156–166. doi: 10.1007/978-3-031-21432-5_17
50. Leonova G.A., Maltsev A.E., Melenevsky V.N., Krivonogov S.K., Kondratyeva L.M., Bobrov V.A., Suslova M.Y. Diagenetic transformation of organic matter in sapropel sediments of small lakes (southern West Siberia and eastern Transbaikalia) // Quat. Int. 2019. V. 524. P. 40–47. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.011
51. Pavlovska I., Klavina A., Auce A., Vanadzins I., Silova A., Komarovska L., Silamikele B., Dobkevica L., Paegle L. Assessment of sapropel use for pharmaceutical products according to legislation, pollution parameters, and concentration of biologically active substances // Sci. Rep. 2020. V. 10. Article No. 21527. doi: 10.1038/s41598-020-78498-6
52. Slukovskii Z.I., Dauvalter V.A. Features of Pb, Sb, Cd accumulation in sediments of small lakes in the south of the Republic of Karelia // Transactions of KarRC RAS. 2020. No. 4. P. 75–94 (in Russian). doi: 10.17076/lim1198
53. Tsybekmitova G.T., Kuklin A.P., Tsyganok V.I. Heavy metals in bottom sediments of Lake Kenon (the Trans-Baikal Territory, Russia) // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 2019. V. 103. No. 2. P. 286–291. doi: 10.1007/s00128-019-02645-7
54. Taran O.P., Boltentkov V.V., Yermolaeva N.I., Zarubina E.Yu, Delii I.V., Romanov R.E., Strakhovenko V.D. Relations between the chemical composition of organic matter in lacustrine ecosystems and the genesis of their sapropel // Geochem. Int. 2018. V. 56. P. 256–265. doi: 10.1134/S0016702918030096.
55. Platonov V.V., Polovetskaya O.S. The features of chemical composition and the biological activity of sapropelae // Journal of New Medical Technologies. eEdition. 2012. No. 3. Article No. 2-24 [Internet resource] <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2012-1/4066.pdf> (Accessed: 01.02.2024) (in Russian).
56. Platonov V.V., Khadartsev A.A., Chunosov S.N., Fridzon K.Y. The biological effect of sapropel // Fundamental Research. 2014. No. 9-11. P. 2474–2480 (in Russian).
57. Kilina E.S., Tronova T.M., Klopotova N.G. Biological activity of therapeutic sapropelic muds of Siberia // Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kultury. 1997. No. 2. P. 23–25 (in Russian).
58. Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V. Artemyeva Z.S., Kogut B.M. Humic Substances: Hypotheses and Reality (a Review) // Eurasian Soil Sc. 2021. V. 54. P. 1826–1854. doi: 10.1134/S1064229321120164
59. Strus O.Y. Study of sapropel extracts from Prybych natural deposits // J. Chem. Pharm. Res. 2015. V. 7. No. 6. P. 133–137.
60. Adeeva L.N., Platonova D.S., Masorov M.S., Didenko T.A. Humic acids from silica sapropel: infrared spectroscopic and thermal analysis // Butlerov Communications. 2013. V. 34. No. 6. P. 65–69 (in Russian).
61. Sherysheva N.G. Bacteriobenthos of sapropel of sulfide lake Shungaldan (National Park “Mari Chodra”, Mari El Republic) // Izvestiya of RAS SamSC. 2023. V. 25. No. 5 (115). P. 195–202 (in Russian).
62. Sleinus D., Sinka M., Korjajkins A., Obuka V., Nikolajeva V., Brencis R., Savicka E. Properties of sound absorption composite materials developed using flax fiber, sphagnum moss, vermiculite, and sapropel // Materials. 2023. V. 16. No. 3. Article No. 1060. doi: 10.3390/ma16031060.
63. Vėjelis S., Karimova M.B., Kuatbayeva T.K., Kairyte A., Šeputytė-Jucikė J. Sapropel as a binding material for wood processing waste in the development of

- thermal insulation biocomposite // *Materials*. 2023. V. 16. No. 6. Article No. 2230. doi: 10.3390/ma16062230
64. Balčiūnas G., Žvironaitė J., Vėjelis S., Jagniatinskis A., Gaidučis S. Ecological, thermal and acoustical insulating composite from hemp shives and sapropel binder // *Industrial Crops and Products*. 2016. V. 91. P. 286–294. doi: 10.1016/j.indcrop.2016.06.034
65. Adeeva L.N., Platonova D.S., Puzhel A.V., Didenko T.A., Belykh N.A. Bifunctional sorbent for sewage treatment obtained from sapropel // *Butlerovskie soobshcheniya*. 2013. V. 34. No. 6. P. 70–75 (in Russian).
66. Potapova I.A., Agliulin V.K., Purygin P.P., Zharubin Yu.P., Maksimov N.M. Humic acids as adsorbents of sulfur and other harmful impurities from oil products // *Butlerov Communications*. 2023. V. 76. No. 10. P. 21–29 (in Russian). doi: 10.37952/ROI-jbc-01/23-76-10-21
67. Lavrenov A.V., P'yanova L.G., Sedanova A.V., Luzyanina L.S. Nanostructured carbon sorbent impregnated with betulin // *Solid Fuel Chem*. 2015. V. 49. P. 7–13 doi: 10.3103/S0361521915010085
68. Zhang Z., Liu S., Wang X., Huang S., Sun K., Xia X. Differences in structure and composition of soil humic substances and their binding for polycyclic aromatic hydrocarbons in different climatic zones // *Environ. Pollut*. 2023. V. 322. Article No.121121. doi: 10.1016/j.envpol.2023.121121
69. Kirejcheva L.V., Khokhlova O.B. Sorbent for integrated treatment of water and ground to remove petroleum products and heavy metals // Patent RU 2198987 C2. Application: 2000132355/13, 25.12.2000. Date of publication: 20.02.2003. Bull. 5 (in Russian).
70. Adeeva L.N., Kovalenko T.A. Removal of organic substances and metal ions from water using a carbon-mineral sapropel sorbent // *Russ. J. Appl. Chem*. 2012. V. 85. P. 557–563. doi: 10.1134/S1070427212040040
71. Krivonos O.I., Terekhova E.N., Babenko A.V., Arbuzov A.B., Belskaya O.B. Conversion of sapropel on CoMo/Al₂O₃ catalyst in supercritical ethanol // *Petroleum Chemistry*. 2021. V. 61. No. 2. P. 157–165 (in Russian). doi: 10.31857/S0028242121020039
72. Latypova D.R., Badamshin A.G., Kuleshov S.P. Timashev E.O., Kulnitskiy B.A., Tomilov Yu.V., Nifantiev N.E., Dokichev V.A. New high-efficiency carbon-silica sorbent // *Russ. J. Appl. Chem*. 2015. V. 88. No. 9. P. 1428–1433. doi: 10.1134/S1070427215090074
73. Plaksin G.V., Levitskiy V.A., Chernyshev A.K., Shipitsyn D.V., Tret'jakov A.G., Likholobov V.A. Porous carbon material preparation process // Patent RU 2264253 C1. Application: 2004102619/15, 29.01.2004. Date of publication: 20.11.2005. Bull. 32 (in Russian).
74. Platonova D.S., Bednyuk A.E., Adeeva L.N. Sorption of phenol by modified humin sorbent from sapropel // *Herald of Omsk University*. 2017. No. 2 (84). P. 56–59 (in Russian).
75. Birgėlaitė R., Valskys V., Ignatavičius G. Use of sapropel for removal of heavy metals from solution // *Sci. – Future Lith*. 2016. V. 8. No. 4. P. 388–396 (in Lithuanian). doi: 10.3846/mla.2016.946
76. Krivonos O.I., Babenko A.V., Belskaya O.B. New approaches for regulation of structure and adsorption properties of biochar based on freshwater sediments (sapropels) // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. V. 680. Article No. 132717. doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.132717
77. Zykova I.V., Isakov V.A., Solov'eva A.M. Preparation and characterization of carbon-mineral sorbents based on sapropel from Novgorod oblast. Part 2 // *Fibre Chem*. 2019. V. 50. No. 6. P. 491–495. doi: 10.1007/s10692-019-10016-5
78. Gladkikh S.N. Sorption method of discoloration of high-color surface natural waters // *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2023. No. 1. P. 32–36 (in Russian).
79. Fang X., Zhang M., Zheng P., Wang H., Wang K., Lv J., Shi F. Biochar-bacteria-plant combined potential for remediation of oil-contaminated soil // *Front. Microbiol*. 2024. V. 15. Article No. 1343366. doi: 10.3389/fmicb.2024.1343366
80. Belik E. Intensification of bioremediation of oil contaminated soils with biosorbents on the basis carbonizate // *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2014. No. 3 (15). P. 127–139 (in Russian).
81. Fokina H.B., Myazin B.A., Gubkina T.G. Studies of soil purification from oil using sorbents of different modification in the conditions of laboratory experiment // *Ecological problems of northern regions and ways of their solution: materialy V Vseross. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem*. V. 2. Apatity: KNTs RAN, 2014. P. 86–90 (in Russian).
82. Buluktaev A.A., Adyanova A.B., Jimbeev N.V., Mukabenova R.A., Mandzhieva S.S., Vasilyeva G.K. Use of natural organic sorbents to increase the effectiveness of bioremediation of oil-polluted soils of the Republic of Kalmykia // *Steppe Science*. 2023. No. 4. P. 146–161 (in Russian). doi: 10.24412/2712-8628-2023-4-146-161
83. Terekhova E.N., Lavrenov A.V., Krivonos O.I. Effect of chemical treatment on properties of carbon-mineral materials from sapropel // *Izvestiya Vuzov. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2016. V. 59. No. 8. P. 90–95 (in Russian).
84. Fomicheva N.V., Smirnova Yu.D., Rabinovich G.Yu. Influence of new humic preparation on remediation of oil-contaminated soil // *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya*. 2022. V. 12. No. 2. P. 310–320 (in Russian). doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-310-320
85. Vaysman Ya.I., Glushankova I.S., Rudakova L.V., Kumi V.V., Tokarev I.P. Development of technology remediation soil contaminated by oil using Gumikom // *Neftyanoe khozyaystvo*. 2013. No. 10. P. 128–131 (in Russian).
86. Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., Ruseva A., Gaivoronsky V. Enzymatic assessment of the state of oil-contaminated soils in the South of Russia after bioremediation // *Toxics*. 2023. V. 11. Article No. 355. doi: 10.3390/toxics11040355

87. Nazarov A.M., Tuktarova I.O., Davletshin T.K., Chetverikov S.P. Processing and research of effectiveness of new biopreparates based on *Rhodococcus* sp. H33, gumates and lignosulfonates for the cleaning of neftezainously contaminated soils // *Neftegazovoe delo*. 2023. V. 21. No. 6. P. 310–321 (in Russian). doi: 10.17122/ngdelo-2023-6-310-321
88. Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.S. Impact of ameliorants on the biological condition of oil-contaminated black soil // *Soil Env.* 2019. V. 38. P. 170–180. doi: 10.25252/SE/19/101872
89. Gretchischeva N.Yu., Perminova I.V., Meshcheryakov S.V. Humic compounds in treatment of oil contaminated environments // *Ecology and Industry of Russia*. 2016. V. 20. No. 1. P. 30–36 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2016-1-30-36
90. Grechishcheva N.Yu., Fekhretdinova D.R., Murygina V.P., Gaydamaka S.N. Evaluation of the effectiveness of humic substances use as washing agents of oil-contaminated soils // *Environmental protection in oil and gas complex*. 2019. No. 6 (291). P. 22–26 (in Russian). doi: 10.33285/2411-7013-2019-6(291)-22-26
91. Aggarwal S., Chakravarty A., Ikram S. A comprehensive review on incredible renewable carriers as promising platforms for enzyme immobilization and thereof strategies // *Int. J. Biol. Macromol.* 2021. V. 167. P. 962–986. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.11.052
92. Kistovich A., Pokazeev K., Chaplina T. Surface Contamination // *Advanced Studies in Ocean Physics. Springer Oceanography*. Springer, Cham, 2021. P. 95–127. doi: 10.1007/978-3-030-72269-2_3
93. Ilinskiy A.V., Chernyakova O.N. To the question of bioremediation in relation to the agricultural land harnessed by oil hydrocarbons // *Modern trends in the development of agrarian complex: materialy mezhdunarod. nauchno-praktich. konf. Solenoe Zaymishche*, 2016. P. 92–97.
94. Al-Mebayedh H., Niu A., Lin C. Strategies for cost-effective remediation of widespread oil-contaminated soils in Kuwait, an environmental legacy of the first Gulf War // *J. Environ. Manage.* 2023. V. 344. Article No. 118601. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118601
95. Maskalchuk L.N., Baklai A.A., Leont'eva T.G. Effect of the organic and mineral constituents of sapropels from Belarus Republic on the selective sorption of radiocesium // *Radiochemistry*. 2018. V. 60. P. 100–103. doi: 10.1134/S1066362218010150