

## Оценка химического состава сапропелей различных месторождений

© 2024. А. В. Сазанов<sup>1</sup>, к. б. н., и. о. зав. кафедрой,  
М. Л. Сазанова<sup>1,2</sup>, к. б. н., доцент, н. с.,  
И. А. Жуйкова<sup>1</sup>, к. г. н., доцент,  
Л. В. Тугаринов<sup>3</sup>, руководитель научного отдела,  
<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
<sup>3</sup>ООО «НПО АХП»,  
656065, Россия, г. Барнаул, ул. Попова, д. 98а,  
e-mail: usr11759@vyatsu.ru

Устойчивый органоминеральный комплекс и широкие возможности добычи обуславливают применение сапропелей и продуктов на их основе в различных отраслях народного хозяйства. С целью изучения пригодности сапропелей для изготовления гуминовых удобрений проанализирован химический состав сапропелевых отложений из 4 пресноводных озёр, располагающихся в пределах широтного отрезка 53–56° с. ш., в условиях умеренного климатического пояса. Результаты анализа химического состава сапропелей из различных месторождений свидетельствуют о среднем содержании органического вещества в их составе, что позволяет отнести сапропели к классу органо-глинистых и определяет возможность их применения для почв лёгкого гранулометрического состава. Сравнительно высокое содержание гуминовых и фульвокислот обуславливает возможность использования исследованных образцов сапропелей для изготовления гуминовых препаратов. Невысокое содержание Р и К может отрицательно сказаться на эффективности удобрений из изученных видов сапропеля; избежать этого можно при добавлении к сапропелям навоза или обогащении их минеральными удобрениями. Содержание микроэлементов в изученных сапропелях находится в пределах установленных норм и обуславливает возможность их применения для восполнения дефицита микроэлементов в дерново-подзолистых почвах.

**Ключевые слова:** сапропель, гуминовые кислоты, микроэлементы, удобрения, гуминовые препараты.

## Chemical composition assessment of sapropels from different deposits

© 2024. A. V. Sazanov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6934-3330<sup>\*</sup>  
M. L. Sazanova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-3492-8395<sup>\*</sup>  
I. A. Zhuikova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7855-604X<sup>\*</sup>  
L. V. Tugarinov<sup>3</sup> ORCID: 0009-0001-5523-3683<sup>\*</sup>  
<sup>1</sup>Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
<sup>2</sup>Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
<sup>3</sup>LLC “Agrokhimprom Scientific and Production Assotiation”,  
98a, Popova St., Barnaul, Russia, 656065,  
e-mail: usr11759@vyatsu.ru

sapropels' suitability for the production of humic fertilizers. Using validated methods we analyze chemical composition of sapropel sediments from 4 freshwater lakes located within the latitudinal section of 53–56° N in the temperate climate. Microbiological parameters of all studied samples are within the normal range. Dry matter content in the range of 46.1–51.3% corresponds to the normative indicators. The mass fraction of organic matter varies in the range of 31.8–39.9% DM. This allows classifying all samples as organo-clay, and determines the possibility of their use for soils of light granulometric composition. The relatively high content of humic (18.3–22.9% DM) and fulvic acids (3.7–6.4% DM) makes it possible to use the studied sapropel samples for the manufacture of humic preparations (especially, a sapropel sample of the lake Chervonoe, Belarus). Low P and K content (0.24–0.36% DM and 0.32–0.42% DM, respectively) can negatively affect the efficiency of fertilizers from these sapropel species; this can be avoided by mixing sapropel with manure or enrichment with mineral fertilizers. Indicators of heavy metal (Cu, Mn, Zn, Co, Pb and Cd) content in all studied samples meet the safety requirements. Samples from deeper layers of the Rusaki Lake (Altai Territory) and the Beloe Lake (Novosibirsk Region) refer to the 1st class of suitability, the rest (according to a number of indicators) – to the 2nd class. The content of trace elements in the studied sapropels is within the established norms and makes it possible to use them for replenishing the deficit of trace elements in soils. In general, all the studied samples can be used as environmentally friendly organomineral fertilizers, as well as production of humic preparations to increase in the biological and energy capacity of agrocenoses and to reproduce the soil fertility.

**Keywords:** sapropel, humic acids, trace elements, fertilizers, humic preparations.

Сапропели – органо-минеральные отложения водоёмов, которые образовались в результате биохимических, микробиологических и механических процессов [1]. В настоящее время в России разведано более 50 тыс. месторождений с прогнозными запасами более 250 млрд м<sup>3</sup> [2]. Сапропели имеют сложный химический состав, включающий как органические (гуминовые кислоты (ГК), фульвокислоты (ФК), битумы, декальцинат, аминокислоты, целлюлоза, гемицеллюлозы, витамины А, Е, D, С, группы В и др.), так и неорганические (макро- и микроэлементы) компоненты [3, 4]. Устойчивый органо-минеральный комплекс и широкие возможности его добычи обуславливают применение сапропелей и продуктов на их основе в различных отраслях экономики.

С середины прошлого века сапропель нашёл применение в сельском хозяйстве, садоводстве, лесоводстве [4]. Установлено, что внесение в почву сапропеля и продуктов на его основе стимулирует рост растений и увеличивает накопление сухого вещества [4–7], увеличивает энергию прорастания семян [8, 9], обеспечивает положительный баланс азота и фосфора и снижает дефицит элементов питания [10]. Активно развивается производство жидких удобрений на основе сапропеля, содержащих комплекс биологически активных веществ, которые стимулируют рост растений [4, 11], а также повышают устойчивость культур к ряду заболеваний [12]. Так, интродукция ультрадисперсной гуминовой суспензии сапропеля позволяет повысить устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды, в частности, снижает накопление Cu, и делает возможным возделывание растений на загрязнённых медью почвах [13]. По данным [14], гуминовые вещества сапропеля

обладают значительной радикалопоглощающей активностью и металлосвязывающей способностью.

Совершенствуются методики извлечения компонентов из сапропелей. Так, в дополнение к традиционной экстракции гуминовых веществ и аминокислот щелочными растворами (NaOH, KOH, pH 10–11) [4, 14, 15], предлагается использование ультразвука; при этом снижается количество используемой щёлочи, а процесс проводится при комнатной температуре и нормальном давлении, что делает его экологически безопасным [16]. Комплексная переработка сапропеля с использованием сверхкритической CO<sub>2</sub>-экстракции позволяет извлекать ценные аминокислоты, а путём дальнейшей карбонизации твёрдого остатка можно получать широкопористые сорбенты для очистки сточных вод, удаления тяжёлых металлов и нефтепродуктов из почв и т. п. [17]. Непригодный для получения ГК карбонатный сапропель может быть использован в качестве раскислителя почв [18–20], для повышения уровня влажности и общей пористости почвы вне зависимости от метеорологических условий [20], а также в составе кормовых добавок для животных [4] и как сырьевой компонент для получения регуляторов роста растений [19].

Классификация сапропелей, обычно принятая в геологии, основывается на указании преобладающего химического состава: карбонатный, кремнезёмистый, органический, железистый [1]. Состав органической массы сапропеля зависит от месторождения и позволяет классифицировать органический, органо-глинистый, органо-кремнезёмистый, органо-известковистый и известковый виды (ГОСТ Р 5400-2010). Состав минеральной части сапропеля в первую очередь зависит от географического положения и геохимического

состава отложений региона; условий формирования и возраста озёрной толщи; химического состава воды, поступающей в озёрную котловину водоёма; химического состава гидробионтов и околводных организмов [21].

Целью нашего исследования стал анализ химического состава сапропелей различных месторождений для производства гуминовых удобрений.

### Материалы и методы исследования

Образцы сапропелей для анализа предоставлены ООО «НПО АХП». В каждом водоёме донные отложения отбирались промышленным способом (ГОСТ 17644-83). Отобранную генеральную пробу готовили к исследованию согласно [22]. Всего проанализировано 6 образцов сапропелей из четырёх озёр:

№№ 1, 2 – оз. Русаки, Панкрушихинский р-н, Алтайский край (53°52'42" N, 80°31'29" E). Бессточное. Образцы отобраны из фракций с разной глубины: до 50 см (№ 1) и глубже 50 см (№ 2).

№№ 3, 4 – оз. Белое, Колыванский р-н, Новосибирская область (55°23'22" N, 82°41'50" E). Находится на территории Колывань-Томской возвышенности в лесостепной зоне. Бессточное, неглубокое, с очень сильно развитой водной растительностью (от 70 до 95% площади озера). Общие запасы органогенных отложений составляют 321 тыс. т [23]. Образцы отобраны из фракций с разной глубины: до 50 см (карбонатный слой отложений) (№ 3) и глубже 50 см (органический слой) (№ 4).

№ 5 – оз. Червоное, Житковичский р-н, Гомельская область, Беларусь (52°24'17" N, 27°58'25" E). Неглубокое (0,6–2,9 м). Имеет сток в реку. Припять по дренажным каналам и р. Бобрик. Берега низкие, торфянистые. Дно сапропелистое (мощность сапропеля 2,03–6,5 м, запасы около 70 млн м<sup>3</sup>) [24].

№ 6 – оз. Убаговас, Резекненский край, Латгалия, Латвия (56°27'23" N, 27°42'14" E). Располагается в низменной заболоченной местности, в пределах Латгальской возвышенности. Максимальная глубина озера 2,3 м, сток осуществляется в оз. Разна. Ведётся разработка сапропеля [25].

Все исследованные озёра располагаются в пределах широтного отрезка 53–56° N, в условиях умеренного пояса, охватывают пространство от 27° E (Средняя Европа) до 82° E (Средняя Сибирь), что отражается в изменении климата, термического и гидрологическо-

го режима водоёмов, в которых происходило формирование сапропелевых отложений. Большинство представленных озёр относятся к малым и мелководным водоёмам (с глубиной 2–3 м), где формируются достаточно продуктивные системы и накапливаются преимущественно донные осадки в виде сапропеля.

Анализ образцов сапропелей проведён в аккредитованных экоаналитической лаборатории и лабораториях центра компетенции «Экологические технологии и системы» Института химии и экологии Вятского государственного университета в 2020–2023 гг. по аттестованным методикам. В каждом образце определяли индекс санитарно-показательных микроорганизмов, кл/г, наличие патогенных и болезнетворных микроорганизмов, кл/г, наличие жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, экз./кг [26, 27]. Определена массовая доля сухого вещества, % (ГОСТ 26713-85); массовая доля органического вещества, % (ГОСТ 27980-88); содержание ГК (в пересчёте на сухое вещество), % (ГОСТ 9517-94, ГОСТ 54221-2010), содержание ФК (в пересчёте на сухое вещество), % [28]. Оценено содержание макроэлементов: калия, % (K<sub>2</sub>O, в пересчёте на сухое вещество; ГОСТ 26718-85), азота общего, % (N<sub>2</sub>, в пересчёте на сухое вещество; ГОСТ 26715-85), фосфора общего, % (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, в пересчёте на сухое вещество; ГОСТ 26717-85), серы, % (SO<sub>3</sub>, в пересчёте на сухое вещество; [22]). Химико-токсикологические показатели включали оценку содержания Fe, % (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в пересчёте на сухое вещество; [22]) и тяжёлых металлов (Pb, Cd, Cu, Mn, Zn, Co), мг/кг (по ГОСТ 53218-2008, [29]).

Аналитические исследования проводили в трёхкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов выполняли стандартными методами с использованием встроенного пакета программ Microsoft Excel; достоверность различий ( $p < 0,05$ ) оценивалась с помощью *t*-критерия Стьюдента.

### Результаты и обсуждение

Согласно результатам, микробиологические показатели всех исследованных образцов находятся в пределах нормы: индекс санитарно-показательных микроорганизмов не превышает 8 (норма – не более 9), патогенные и болезнетворные микроорганизмы, жизнеспособные яйца и личинки гельминтов не обнаружены, что делает возможным использование данных сапропелей для производства удобрений и гуминовых препаратов.

Таблица / Table

Химический состав исследованных образцов сапропелей  
Chemical composition of the studied sapropel samples

Показатель Indicator	Образец / Sample					
	1	2	3	4	5	6
Сухое вещество, % Dry matter, %	50,8 ±4,6	51,3 ±4,9	49,3 ±3,8	46,1 ±4,4	50,3 ±3,9	48,6 ±4,2
Органическое вещество, %* Organic matter, % DM	39,9 ±3,6	39,6 ±3,5	37,8 ±3,5	31,8 ±3,1	39,1 ±3,5	36,5 ±3,4
Гуминовые кислоты, % Humic acids, % DM	21,2 ±1,9	20,6 ±1,8	21,5 ±1,5	18,3 ±2,0	22,9 ±1,9	20,7 ±1,7
Фульвокислоты, % Fulvic acids, % DM	5,1 ±0,3	5,4 ±0,3	6,0 ±0,5	3,7 ±0,3 1,2,3	6,4 ±0,5 4	5,80 ±0,4 4
N <sub>общ.</sub> , % N <sub>total</sub> , % DM	1,27 ±0,2	1,36 ±0,4	1,46 ±0,15	1,24 ±0,4	1,24 ±0,12	1,32 ±0,19
P <sub>общ.</sub> , % P <sub>total</sub> , % DM	0,34 ±0,03	0,3 ±0,02	0,32 ±0,02	0,24 ±0,03	0,36 ±0,03	0,30 ±0,02
K <sub>общ.</sub> , % K <sub>total</sub> , % DM	0,40 ±0,03	0,36 ±0,02	0,32 ±0,01	0,39 ±0,03	0,42 ±0,03 3	0,35 ±0,02
S (SO <sub>3</sub> ), % DM	4,1 ±0,18	3,6 ±0,17	4,3 ±0,17 2	4,2 ±0,23	4,33 ±0,15 2	4,4 ±0,19 2
Fe (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), % DM	12,5 ±0,8	15,1 ±1,1	9,3 ±0,5 1,2	17,6 ±1,3 1,3	8,0 ±0,4 1,2,4	10,1 ±0,6 2,4,5
Cu, мг/кг / mg/kg	60,4 ±0,7	52,8 ±0,5 1	116,8 ±3,1 1,2	37,2 ±0,3 1-3	104,1 ±0,8 1-4	94,3 ±0,6 1-5
Mn, мг/кг / mg/kg	282,6 ±10,2	306,9 ±12,5	210,5 ±7,0 1,2	124,2 ±0,8 1-3	184,0 ±5,5 1-4	233,2 ±9,7 1,2,4,5
Zn, мг/кг / mg/kg	116,0 ±11,7	85,8 ±8,3	104,6 ±8,7	92,5 ±0,5	66,1 ±5,9 1,3,4	95,8 ±8,4 5
Co, мг/кг / mg/kg	24,5 ±0,6	12,8 ±0,3 1	20,2 ±0,4 1,2	4,3 ±0,1 1-3	12,5 ±0,3 1,3,4	29,2 ±0,7 1-5
Pb, мг/кг / mg/kg	39,2 ±1,4	23,7 ±0,6 1	54,3 ±1,9 1,2	16,1 ±0,2 1-3	38,4 ±1,3 1,3,4	42,5 ±1,6 1,3,4
Cd, мг/кг / mg/kg	2,1 ±0,2	1,6 ±0,1	3,9 ±0,1 1,2	–	5,4 ±0,1 1,2,3	5,4 ±0,1 1,2,3

Примечание. \* – здесь и далее показатель в % указан в пересчёте на сухое вещество. Жирным шрифтом выделены значения 2 класса пригодности. Под чертой – достоверные отличия с соответствующими образцами. Прочерк означает менее предела обнаружения.

Note. \* – here and below the indicator in % is given in terms of dry matter. Values of suitability class 2 are marked in bold. Under the line – reliable differences with the corresponding samples. A dash indicates less than the detection limit.

Основные результаты исследования химического состава сапропелей приведены в таблице. Содержание сухого вещества во всех образцах находилось в пределах 46,1–51,3%, что соответствует норме (не менее 40%).

Массовая доля органического вещества в исследованных озёрных сапропелях варьирует в пределах 31,8–39,9%, что позволяет отнести все образцы к группе органо-глинистых. Глинистые частицы обеспечивают высокую

водоудерживающую и низкую фильтрационную способность сапропеля, что положительно сказывается на улучшении водно-физических свойств лёгких (супесчаной и среднесуглинистой) почв [30]. Однако высокое содержание глинистых частиц в сапропелях затрудняет производство гуминовых препаратов из них. В частности, во избежание загустевания препарата требуется повышать температуру и количество используемой для экстракции щёлочи, что, в свою очередь, приводит к разрушению большинства биологически активных веществ. Использование деспергаторов позволяет решить проблему, но значительно увеличивает стоимость препарата и снижает его «экологическую чистоту».

Содержание ГК варьировало в пределах 18,3–22,9% (в пересчёте на сухое вещество). Наибольшее количество ФК отмечено для образца № 5 ( $6,4 \pm 0,5\%$ ), наименьшее – для образца № 4 ( $3,7 \pm 0,3\%$  в пересчёте на сухое вещество; достоверно отличается от значений, полученных для других образцов). В сравнении с гуминовыми кислотами ФК имеют более низкую молекулярную массу, а их химическая активность объясняется высоким содержанием кислорода, карбоксильных и гидроксильных групп. Хелатирующие свойства ФК в сочетании с нетоксичностью, эффективностью при низких концентрациях повышают ценность содержащих их гуминовых препаратов [31]. Сравнительно высокое содержание ГК и ФК обуславливает возможность использования исследованных образцов (в первую очередь, образца № 5 с высоким содержанием ГК и ФК) для изготовления гуминовых препаратов: удобрений, сорбентов, продуктов для санации и ремедиации почв, продуктов для химической промышленности, биосовместимых плёнок и т. п. [32].

В исследованных образцах общее содержание основных элементов минерального питания растений находилось в пределах требований ГОСТ 54221-2010 и составляло (в пересчёте на сухое вещество):  $N_{\text{общ.}} - 1,27-1,46\%$ ,  $P_{\text{общ.}} - 0,24-0,36\%$ ,  $K_{\text{общ.}} - 0,32-0,42\%$ . По данным [18], общее содержание биогенных элементов – азота, фосфора, калия – определяет агрохимическую эффективность сапропелей. Невысокое содержание P и K может отрицательно сказаться на эффективности удобрений из данных видов сапропеля; избежать этого можно при смешивании сапропеля с навозом или обогащении минеральными удобрениями [2].

Содержание серы в пределах 3,6–4,4% (в пересчёте на сухое вещество) незначитель-

но превышало установленный норматив (не более 3%). Учитывая относительно высокое содержание железа (8,0–17,6%, в пересчёте на сухое вещество), вышеуказанное можно объяснить накоплением биологически активных S и Fe в различных слоях сапропеля в результате минерализации (в основном, микробиологической) органического вещества сапропеля [33].

Показатели содержания тяжёлых металлов, в том числе, эссенциальных Cu, Mn, Zn, Co, во всех исследованных образцах отвечают требованиям безопасности (ГОСТ 54000-2010) и позволяют отнести образцы № 2 и № 4 к 1 классу пригодности, остальные (по ряду показателей) – ко 2 классу (табл.).

Повышенное содержание Co в образце № 2 (24,5 мг/кг) может быть связано с особенностями геохимического состава почвообразующих пород и почв региона (Алтайский край). Так, по данным [34], содержание Co в почвах региона, где был отобран образец № 2, высокое: от 23,0 мг/кг в бурых лесных до 29,0 мг/кг в серых лесных почвах; кроме того, Co хорошо сорбируется гидроокислами Fe и особенно Mn, а также глинистыми минералами. Кобальт является эссенциальным микроэлементом для многих культур, в первую очередь, бобовых. В целом, под действием Co повышается активность ряда ферментов (дегидрогеназ, гидрогеназы, нитратредуктазы), увеличивается содержание хлорофилла, общего гематина и связанного с хлорофиллом витамина E и т. д. [35]. Наиболее бедны подвижными, доступными растению соединениями Co дерново-подзолистые почвы лёгкого гранулометрического состава; при известковании почв потребность в Co возрастает [36, 37], в связи с чем образец № 2 подходит в качестве органоминерального удобрения для вышеуказанного типа почв.

Высокое содержание меди в образце № 3 (116, 8 мг/кг), в отличие от образца № 4 (37,2 мг/кг), можно объяснить разной глубиной забора проб сапропеля. По данным [23], повышенное содержание Cu в верхних интервалах сапропеля оз. Белое является следствием концентрационной функции живого вещества, которое при отмирании поступает в осадок. В местах разложения растительных остатков наблюдается восстановительная обстановка, способствующая осаждению Cu [23]. С другой стороны, осаждение Cu может быть связано с сорбцией органическими веществами (образованием внутрикомплексных нерастворимых соединений ГК с медью), а также гидроокислами железа и марганца [21].

Третьей причиной может быть антропогенное воздействие, которое способствует накоплению летучих соединений Си в атмосферном аэрозоле, а при выпадении атмосферных осадков Си накапливается в гидробионтах – поставщиках органического вещества. В более глубоких горизонтах донных отложений отмечается резкое падение концентрации Си, что обусловлено её выщелачиванием из осадка в поровую воду [23].

Медь в оптимальных концентрациях является эссенциальным микроэлементом, важным кофактором ряда ферментов, которые выполняют ключевые функции в метаболизме растительных клеток [38, 39]. С другой стороны, при избыточном поступлении медь является токсичным металлом: окислительно-восстановительные циклы между  $Cu^{2+}$  и  $Cu^+$  увеличивают продукцию высокотоксичных гидроксильных радикалов с последующим повреждением клеток на уровне липидов, мембран, нуклеиновых кислот, белков и других биомолекул [39]. В связи с этим, при внесении в почвы сапропеля (особенно с низким содержанием гуминовых кислот) в качестве удобрений важно учитывать исходный уровень меди в почвах.

Высокое содержание Pb в образце № 3 (54,3 мг/кг), в отличие от образца № 4 (16,1 мг/кг) также объясняется разной глубиной забора проб сапропеля (образец № 3 – из верхних слоёв осадка). В целом, повышенное содержание Pb в образце № 3 и Cd в образцах № 5 и № 6 можно объяснить антропогенным воздействием на озёрные экосистемы [15, 23, 33, 40, 41]. Подобные результаты получены при изучении накопления Cd в сапропелях озёр восточной Сибири [23, 33], Латвии [40], Карелии [41]. Так, анализ вертикального распределения кадмия в малых озёрах Карелии показал, что рост его концентрации фиксируется в верхней части разрезов и датируется началом XX века; основной источник поступления кадмия – воздушный перенос (иногда на сотни км) от сжигания ископаемого угля [41].

### Заключение

Изучение химического состава сапропелей из различных месторождений показало среднее содержание в них органического вещества, что позволяет отнести их к классу органо-глинистых и определяет возможность их применения в качестве удобрений для почв лёгкого гранулометрического состава. Сравнительно высокое содержание гуминовых и

фульвокислот обуславливает возможность использования исследованных образцов сапропелей (в первую очередь, образец из оз. Червоное с высоким содержанием ГК и ФК) для изготовления гуминовых препаратов. Не-высокое содержание азота, фосфора и калия может отрицательно сказаться на эффективности удобрений из данных видов сапропеля, поэтому при производстве удобрений рекомендуется обогащать сапропель минеральными удобрениями, содержащими N, P, K. Содержание микроэлементов в изученных сапропелях находится в пределах установленных норм и обуславливает возможность их применения для восполнения дефицита микроэлементов в дерново-подзолистых почвах при условии предварительной оценки содержания тяжёлых металлов в почве.

В целом, все исследованные образцы сапропелей отвечают требованиям стандартов и могут быть использованы в качестве экологически чистых органо-минеральных удобрений, а также для производства гуминовых препаратов, применение которых обеспечивает повышение биологической и энергетической ёмкости агроценозов, воспроизводство плодородия почв.

### Литература

1. Лопотко М.З. Озёра и сапропель. Минск: Наука и техника, 1978. 88 с.
2. Анисимова Т.Ю. Использование ресурсов торфа и сапропеля в сельском хозяйстве Нечернозёмной зоны России: состояние вопроса и перспективы // Проблемы агрохимии и экологии. 2022. № 1. С. 51–58. doi: 10.26178/AE.2022.76.68.004
3. Адеева Л.Н., Коваленко Т.А., Кривонос О.И., Плаксин Г.В., Струнина Н.Н. Определение химического состава сапропеля // Химия и химическая технология. 2009. Т. 52. № 3. С. 121–123.
4. 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.
5. Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., Ievinsh 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
6. Танирбергенов С.И., Сулейменов Б.У., Зэрш З.А. Применение органического гуминового удобрения «Тумат» при возделывании сои // Почвоведение и агрохимия. 2023. № 1. С. 74–85. doi: 10.51886/1999-740X\_2023\_1\_74

7. Никулина А.Н. Возможности использования сапропеля для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур // Известия Горского государственного аграрного университета. 2022. Т. 59. № 3. С. 7–14. doi: 10.54258/20701047\_2022\_59\_3\_7
8. Скамарохова А.С., Кравченко Р.В., Юрин Д.А., Свистунов А.А. Результаты проращивания озимой пшеницы, овса и маша с применением нового органического удобрения на основе сапропеля // Научный журнал КубГАУ. 2023. № 189. С. 46–53. doi: 10.21515/1990-4665-189-006
9. Рыбалкина Е.И., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние сапропеля на биологическую активность каштановой почвы // Агрехимический вестник. 2023. № 4. С. 39–46. doi: 10.24412/1029-2551-2023-4-007
10. Плотников А.М., Созинов А.В. Баланс элементов питания в севообороте при использовании сапропеля, извести, азотно-фосфорного удобрения // Проблемы агрохимии и экологии. 2022. № 3-4. С. 26–31. doi: 10.26178/AE.2022.71.83.003
11. Федосеева Е.В., Терехова В.А., Якименко О.С., Гладкова М.М. Экоотоксикологическая оценка гуминовых препаратов разного происхождения с применением микроводорослей *Scenedesmus quadricauda* // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 4. С. 45–49. doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-045-049
12. Пономарева М.А. Химический состав и пути использования сапропелей Татарстана: автореф. дис. ... канд. хим. наук. СПб, 2002. 20 с.
13. Румянцев В.А., Пухальский Я.В., Лоскутов С.И., Митюков А.С., Хомяков Ю.В., Панова Г.Г. Влияние ультрадисперсной гуминовой суспензии сапропеля на рост, фотосинтетическую активность и накопление меди горохом (*Pisum sativum* L.) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 1. С. 86–93. doi: 10.31857/S268673972111013X
14. Obuka V., Boroduskis M., Ramata-Stunda A., Klavins L., Klavins M. Sapropel processing approaches towards high added-value products // Agronomy Research. 2018. No. 16 (S1). P. 1142–1149. doi: 10.15159/AR.18.119
15. 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 // Scientific Reports. 2020. V. 10. Article No. 21527. doi: 10.1038/s41598-020-78498-6
16. Кошелев А.В., Головков В.Ф., Пыжьянов И.В., Елеев Ю.А., Глухан Е.Н. Интенсификация химико-технологических процессов получения гуминовых препаратов при использовании ультразвука // Химия и технология органических веществ. 2023. № 3 (27). С. 69–80.
17. Krivonos O.I., Belskaya O.B. A new waste-free integrated approach for sapropel processing using supercritical fluid extraction // J. of Supercritical Fluids. 2020. V. 166. Article No. 104991. doi: 10.1016/j.supflu.2020.104991
18. Костенков Н.М. Эколого-агрехимическая оценка осадочных отложений озёр морских террас побережья Японского моря // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 2. С. 30–34. doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-030-034
19. Курзо Б.В., Кляуззе И.В., Ворона М.В., Серая С.М., Гайдукевич О.М. Использование торфа и сапропеля для получения гуминового регулятора роста растений // Природопользование. 2022. № 1. С. 136–145. doi: 10.47612/2079-3928-2022-1-136-145
20. Daugvilienė D., Burba A., Bakšienė E. Changes of sandy loam Cambisol properties at application for calcareous sapropel and limestone // J. Food Agric. Environ. 2014. V. 12. No. 1. P. 491–495.
21. Успенская О.Н., Васючков И.Ю. Микроэлементы в сапропелях – природном материале на удобрение для органического земледелия // Агрехимия. 2019. № 10. С. 52–57. doi: 10.1134/S0002188119100132
22. Методические указания по агрохимическому анализу сапропелей. М.: ЦИНАО, 1982. 52 с.
23. Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Бобров В.А., Кривоногов С.К. Геохимия сапропелей голоценовых разрезов из малых озёр юга Западной Сибири и Восточного Прибайкалья. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2019. 444 с. doi: 10.21782/B978-5-6041446-9-5
24. Курзо Б.В., Гайдукевич О.М. Ресурсы сапропеля Припятского Полесья и перспективы их использования // Природные ресурсы Полесья: оценка, использование, охрана: материалы международной научно-практической конференции. Пинск: УО «Полесский государственный университет», 2015. С. 166–170.
25. Ubogovas ezers [Электронный ресурс] <https://www.ezeri.lv/database/1075/> (Дата обращения: 23.12.2023).
26. МУК 4.2.796–99. Методы санитарно-паразитологических исследований. Методические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000. 67 с.
27. МУ 2293-81. Методические указания по санитарно-микробиологическому исследованию почвы. М., 1981. 14 с.
28. Андреевас З.Ф., Колосов И.В., Соломинская Б.А. Способ получения препаратов гуминовых и фульвокислот из почв // Патент SU 268741 А1. Заявление: 1258774/30-15, 18.07.1968. Дата публикации: 10.04.1970. Бюлл. 14.
29. Методические указания по определению тяжёлых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
30. Иванова Ж.А., Костыгова В.В., Пономарёва М.А. Скрытые резервы повышения эффективности земледелия на северо-западе России // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве: материалы всерос. научн. конф. с междунар. участием. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2018. С. 164–170.

31. Nikoogoftar-Sedghi M., Rabiei V., Razavi F., Molaei S., Khadivi A. Fulvic acid foliar application: a novel approach enhancing antioxidant capacity and nutritional quality of pistachio (*Pistacia vera* L.) // BMC Plant Biol. 2024. V. 24. Article No. 241. doi: 10.1186/s12870-024-04974-0

32. Загребин Е.М., Соснов А.В., Землякова М.А., Пуцыкин Ю.Г., Шаповалов А.А. Новые высокотехнологические сорбенты и сорбенты-биодеструкторы на основе гуминовых кислот в качестве средств ремедиации и рекультивации загрязненных почв // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 4. С. 24–29. doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-029-037

33. Bogush A.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., Bychinsky V.A., Bobrov V.A., Maltsev A.E., Tikhova V.D., Miroschnichenko L.V., Kondratyeva L.M., Kuzmina A.E. Biogeochemistry and element speciation in sapropel from freshwater Lake Dukhovie (East Baikal region, Russia) // Appl. Geochem. 2022. V. 143. Article No. 105384. doi: 10.1016/j.apgeochem.2022.105384

34. Трошкова И.А., Балыкин С.Н., Пузанов А.В., Салтыков А.В. Железо, кобальт и никель в лесных почвах северо-восточного Алтая // Известия АОРГО. 2023. № 1 (68). С. 43–54.

35. Елькина Г.Я. Кобальт в системе почва–растение на подзолистых почвах европейского северо-востока России // Агрохимия. 2021. № 7. С. 75–82. doi: 10.31857/S000218812107005X

36. Шеуджен А.Х. Аканова Н.И., Бондарева Т.Н. Агрохимия. Ч. 6. Экологическая агрохимия. Майкоп: ООО «Полиграф-ЮГ», 2018. 575 с.

37. Уткин А.А., Аканова Н.И., Нода И.Б. Динамика содержания и распределения микроэлементов в дерново-подзолистых почвах и растениях агроценозов // Агрохимия. 2023. № 8. С. 3–15. doi: 10.31857/S0002188123080100

38. Елькина Г.Я. Содержание аминокислот в растениях при разных уровнях содержания меди в почве // Агрохимия. 2018. № 12. С. 88–96. doi: 10.1134/S0002188118120050

39. Adamczyk-Szabela D., Wolf W.M. The influence of copper and zinc on photosynthesis and phenolic levels in basil (*Ocimum basilicum* L.), borage (*Borago officinalis* L.), common nettle (*Urtica dioica* L.) and peppermint (*Mentha piperita* L.) // Int. J. Mol. Sci. 2024. V. 25. Article No. 3612. doi: 10.3390/ijms25073612

40. Stankevica K., Klavins M., Rutina L. Accumulation of metals in sapropel // Mater. Sci. Appl. Chem. 2012. V. 26. P. 99–105.

41. Слукровский З.И., Даувальтер В.А. Особенности накопления свинца, сурьмы и кадмия в отложениях малых озёр юга Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 4. С. 75–94. doi: 10.17076/lim1198

## References

1. Lopotko M.Z. Lakes and sapropel. Minsk: Nauka i tekhnika, 1978. 88 p (in Russian).

2. 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

3. 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).

4. 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.

5. Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., Ievinsh G. Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growthaffecting activity and cultivable microorganism content // Zemdirbyste-Agriculture. 2014. V. 101. No. 4. P. 355–366. doi: 10.13080/z-a.2014.101.045

6. Tanirbergenov S.I., Suleimenov B.U., Zarip Z.A. Organic humic fertilizer «Tumat» application in the cultivation of soybeans // Soil Science and Agrichemistry. 2023. No. 1. P. 74–85 (in Russian). doi: 10.51886/1999-740X\_2023\_1\_74

7. Nikulina A.S. Opportunities of using sapropel for increasing productivity of crops // Proceedings of Gorsky State Agrarian University. 2022. V. 59. No. 3. P. 7–14 (in Russian). doi: 10.54258/20701047\_2022\_59\_3\_7

8. Skamarokhova A.S., Kravchenko R.V., Yurin D.A., Svistunov A.A. The results of germination of winter wheat, oats and mash with the use of a new organic fertilizer based on sapropel // Scientific Journal of KubSAU. 2023. No. 189. P. 46–53 (in Russian). doi: 10.21515/1990-4665-189-006

9. Rybalkina E.I., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Influence of sapropel on biological activity of chestnut soil // Agrochemical Bulletin. 2023. No. 4. P. 39–46 (in Russian). doi: 10.24412/1029-2551-2023-4-007

10. Plotnikov A.M., Sozinov A.V. The balance of nutrition elements in crop rotation with the use of sapropel, lime, nitrogen-phosphorus fertilizer // Agrochemistry and ecology problems. 2022. No. 3-4. P. 26–31 (in Russian). doi: 10.26178/AE.2022.71.83.003

11. 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

12. Ponomareva M.A. Chemical composition and application possibilities of Tatarstan sapropel: Ph.D. chem. sci. diss. abstr. Sankt-Peterburg, 2002. 20 p. (in Russian).

13. Rumyantsev V.A., Puhalsky Ya.V., Loskutov S.I., Mityukov A.S., Khomyakov Yu.V., Panova G.G. Influence of ultradisperse humic sapropel suspension on growth, photosynthetic activity, and copper accumulation in peas (*Pisum sativum* L.) // Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle. 2021. V. 501. No. 1. P. 86–93 (in Russian). doi: 10.31857/S268673972111013X

14. Obuka V., Boroduskis M., Ramata-Stunda A., Klavins L., Klavins M. Sapropel processing approaches

- towards high added-value products // *Agronomy Research*. 2018. No. 16 (S1). P. 1142–1149. doi: 10.15159/AR.18.119
15. 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 // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. Article No. 21527. doi: 10.1038/s41598-020-78498-6
16. Koshelev A.V., Golovkov V.F., Pyzhyanov I.V., Eleev Yu.A., Glukhan E.N. Intensification of chemical-technological processes for obtaining humic preparations using ultrasound // *Chemistry and Technology of Organic Substances*. 2023. No. 3 (27). P. 69–80 (in Russian).
17. Krivonos O.I., Belskaya O.B. A new waste-free integrated approach for sapropel processing using supercritical fluid extraction // *J. of Supercritical Fluids*. 2020. V. 166. Article No. 104991. doi: 10.1016/j.supflu.2020.104991
18. 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
19. Kurzo B. V., Klyauzze I. V., Vorona M. V., Seraya S. M., Gaidukevich O. M. Use of peat and sapropel for obtaining humic plant growth regulator // *Nature Management*. 2022. No. 1. P. 136–145 (in Russian). doi: 10.47612/2079-3928-2022-1-136-145
20. Daugvilienė D., Burba A., Bakšienė E. Changes of sandy loam Cambisol properties at application for calcareous sapropel and limestone // *J. Food Agric. Environ.* 2014. V. 12. No. 1. P. 491–495.
21. 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
22. Methodical instructions for agrochemical analysis of sapropels. Moskva: CINAО, 1982. 52 p. (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. Kurzo B.V., Gaidukevich O.M. Sapropel resources of Pripyat Polesie and prospects for their use // *Natural resources of Polesie: assessment, use, conservation: materials of mezhhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Pinsk: UO “Poleskiy gosudarstvennyy universitet”, 2015. P. 166–170 (in Russian).
25. Ubogovas ezers [Internet resource] <https://www.ezeri.lv/database/1075/> (Accessed: 23.12.2023).
26. MUK 4.2.796-99. Methods of sanitary-parasitological research. Methodical instructions. Moskva: Federal Center of Gossanepidnadzor of the Ministry of Health of Russia, 2000. 67 p. (in Russian).
27. MU 2293-81. Methodical instructions for sanitary-microbiological examination of soil. Moskva, 1981. 14 p. (in Russian).
28. Andreevas Z.F., Kolosov I.V., Solominskaya B.A. Method of preparation of humic and fulvic acids from soils // Patent SU 2426779 A1. Application: 1258774/30-15, 18.07.1968. Date of publication: 10.04.1970. Bull. 14 (in Russian).
29. Methodical instructions for determination of heavy metals in soils of agricultural lands and crop production. Moskva: CINAО, 1992. 61 p. (in Russian).
30. Ivanova Zh.A., Kostygova V.V., Ponomaryova M.A. Hidden reserves of increase of efficiency of agriculture in the north-west of Russia // *Application of Earth remote sensing in agriculture: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhhdunarodnym uchastiem*. Sankt-Peterburg: FGBNU AFI, 2018. P. 164–170 (in Russian).
31. Nikoogoftar-Sedghi M., Rabiei V., Razavi F., Molaei S., Khadivi A. Fulvic acid foliar application: a novel approach enhancing antioxidant capacity and nutritional quality of pistachio (*Pistacia vera* L.) // *BMC Plant Biol.* 2024. V. 24. Article No. 241. doi: 10.1186/s12870-024-04974-0
32. Zagrebin E.M., Sosnov A.V., Sadovnikov S.V., Zemlyakova M.A., Putsykin Yu.G., Shapovalov A.A. New high-tech sorbents and biodestructor-sorbents on the basis of humic acid as a means of remediation and reclamation of contaminated soil // *Theoretical and Applied Ecology*. 2012. No. 4. P. 21–29 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-029-037
33. 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
34. Troshkova I.A., Balykin S.N., Puzanov A.V., Saltykov A.V. Iron, cobalt and nickel in forest soils of the North-Eastern Altai // *Bulletin AB RGS*. 2023. No. 1 (68) P. 43–54 (in Russian).
35. El’kina G.Ya. Cobalt in the soil–plant system on podzolic soils of the European North-East of Russia // *Agrochemistry*. 2021. No. 7. P. 75–82. doi: 10.31857/S000218812107005X
36. Sheujen A.H. Akanova N.I., Bondareva T.N. Agrochemistry. P. 6. Ecological agrochemistry. Maykop: OOO “Poligraf-YuG”, 2018. 575 p. (in Russian).
37. Utkin A.A., Akanova N.I., Noda I.B. Dynamics of the content and distribution of trace elements in sod-podzolic soils and plants of agrocenoses // *Agrohimiya*. 2023. No. 8. P. 3–15 (in Russian). doi: 10.31857/S0002188123080100
38. El’kina G.Ya. Effect of copper level in soil on nitrogen metabolism and amino acid synthesis in plants // *Agrochemistry*. 2018. No. 12. P. 88–96 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188118120050
39. Adamczyk-Szabela D., Wolf W.M. The influence of copper and zinc on photosynthesis and phenolic levels in basil (*Ocimum basilicum* L.), borage (*Borago officinalis* L.), common nettle (*Urtica dioica* L.) and peppermint (*Mentha piperita* L.) // *Int. J. Mol. Sci.* 2024. V. 25. Article No. 3612. doi: 10.3390/ijms25073612
40. Stankevica K., Klavins M., Rutina L. Accumulation of metals in sapropel // *Mater. Sci. Appl. Chem.* 2012. V. 26. P. 99–105.
41. 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