

УДК 631.81.031

UDC 631.81.031

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки)

4.1.3. Agrochemistry, agro-soil science, plant protection and quarantine (agricultural sciences)

ВЛИЯНИЕ САПОНИТА НА СОРБЦИЮ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ НА ПРИМЕРЕ НИТРАТ-ИОНОВ И ИОНОВ КАЛИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕГО В КАЧЕСТВЕ АГРОХИМИКАТА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

THE EFFECT OF SAPONITE USED AS AN AGROCEMICAL IN AGRICULTURAL ON THE NUTRIENTS SORPTION (AN EXAMPLE OF NITRATE IONS AND POTASSIUM IONS)

Никитина Мария Викторовна
к.х.н., доцент
SPIN – 2964-2641; Scopus, ID 5671541590; WoS, ID AAJ-2975-2021
E-mail: m.nikitina@narfu.ru
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» 163002, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, 17

Nikitina Maria Viktorovna
Cand.Chem.Sci., Associate Professor
RSCI SPIN – code: 2964-2641
Scopus ID 5671541590; WoS, ID AAJ-2975-2021
E-mail: m.nikitina@narfu.ru
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», 163002, Russia, Arkhangelsk, nab. Severnoy Dvini, 17

Наквасина Елена Николаевна
д.с.-х.н., профессор
SPIN – 6797-9434; Scopus, ID 35389250000; WoS, ID A-5165-2013
E-mail: e.nakvasina@narfu.ru
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» 163002, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, 17

Nakvasina Elena Nikolaevna
Doctor of Science (Agriculture), Professor
RSCI SPIN – code: 6797-9434;
Scopus ID 35389250000; WoS, ID A-5165-2013
E-mail: e.nakvasina@narfu.ru
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», 163002, Russia, Arkhangelsk, nab. Severnoy Dvini, 17

Применение побочных продуктов добывающей промышленности в сельском хозяйстве можно считать перспективным и важным этапом ресурсосбережения и снижения негативного воздействия на компоненты окружающей среды. В этой связи сапонит-содержащие материалы, которые являются многотоннажными побочными продуктами добычи алмазов, рассматриваются как агрохимикат, который уже показал свою эффективность. Однако вопрос взаимодействия вносимого сапонита с элементами питания растений на данный момент не изучен. Цель данного исследования – изучение сорбционных свойств сапонита по отношению к элементам питания растений (NO_3^- , K_2O) при его применении в качестве агрохимиката. В модельных опытах изучены сорбционные способности сапонита с АО «Севералмаз». Определена степень сорбции в отношении указанных ионов как для сухого сапонита, так и для системы почва – сапонит при внесении сапонита в количестве 50 т/га. В качестве объекта были выбраны агрозем (окультуренная почва, которая применяется для выращивания сельскохозяйственной продукции), дерново-подзолистая лесная почва и верховая торфяная. Установлено, что сухой сапонит сорбирует нитрат-ионы со степенью сорбции 70-90%, а сорбция ионов калия наблюдается только в области

The use of the mining industry by-products in agriculture can be considered as an important stage of resource conservation and reduction of the negative impact for the environment. In this regard, saponite-containing materials, which are multi-ton by-products of diamond mining, are considered as an ameliorant that has already proven its effectiveness. However, the interaction of the saponite with plant nutrients has not been studied yet. The purpose of this research is to study the sorption properties of saponite to plant nutrients (NO_3^- , K_2O) used as an agrochemical. In model experiments, the sorption capacity of saponite from Public Joint Stock Company Severalmaz was studied. The degree of sorption in relation to the NO_3^- , K_2O was determined for dry saponite and the soil-saponite system with added saponit 50 t/ha. Agrozem (cultivated soil used for growing agricultural products), sod-podzolic forest soil and high-moor peat soil were chosen as the object. It has been established that dry saponite sorbs nitrate ions with a sorption degree of 70-90%. The sorption of potassium ions is observed only in the high concentrations area. In this area sorption is 30-60%. The sorption of nitrate ions and potassium ions is observed only in the high concentrations in the system soil-saponit. At the same time, the saponite addition increases the sorption properties of peat soil in relation to NO_3^- and reduces them to potassium ions. For mineral soils - sandy loam

больших концентраций и составляет 30–60%. При внесении сапонита в почву сорбция нитрат-ионов и ионов калия отмечается только в области высоких концентраций. При этом внесение сапонита в большей степени повышает сорбционные свойства торфяной почвы по отношению к нитрат-ионам и снижает их по отношению к ионам калия. Для минеральных почв – агрозема супесчаного и лесной дерново-подзолистой почвы (легкосуглинистой), существенного влияния на сорбционные свойства добавка сапонита не оказывает

Ключевые слова: САПОНИТ, АГРОХИМИКАТ, СОРБЦИЯ, ЭЛЕМЕНТЫ ПИТАНИЯ, НИТРАТ-ИОНЫ, ИОНЫ КАЛИЯ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-206-015>

Финансирование: Данная работа финансировалась за счет средств проекта (Постановление Правительства Российской Федерации №218) «Создание высокотехнологичной системы подготовки оборотной воды обогатительной фабрики АО «Севералмаз» с переработкой отходов в товарную продукцию».

agrozem and forest sod-podzolic soil, the addition of saponite does not have a significant effect on the sorption properties

Keywords: SAPONITE, AGROCHEMICAL, SORPTION, NUTRIENTS, NITRATE IONS, POTASSIUM IONS

Financing: This work was financed by the project (Resolution of the Government of the Russian Federation No. 218) “Creation of a high-tech system for the preparation of recycled water from the preparation plant of Severalmaz JSC with the processing of waste into marketable products.”

Введение. С 1999 года в Архангельской области началась активная разработка алмазных месторождений. Важной особенностью таких месторождений, является высокое содержание минералов монтмориллонитовой группы (сапониты), которые обладают высоким сорбционными характеристиками [1]. Сапонит-содержащие отходы алмазодобывающей промышленности представляют собой специфическую категорию минеральных остатков, образующихся в процессе извлечения алмазов. По данным федерального статистического наблюдения за 2023 год, в Архангельской области наибольшую площадь захоронения отходов из промышленных объектов занимает объект размещения отходов алмазодобывающей промышленности АО Севералмаз (хвостохранилища 600,517 га, отвалы вскрышных пород 440,7 га) [2].

В пробах сапонит-содержащих материалов преобладает Si (53,48 %) и Mg (25,94 %). В его состав также входят Fe (7,04 %), Ca (4,27 %), Al (3,87 %), Na (1,065 %), K (0,992 %), H (0,875 %), Ti (0,82 %), P (0,52 %), C (0,43

%) [3]. Он представляет собой новый вид минерального сырья многоотраслевого использования.

В последние годы сапонит активно исследовался [4-8] как ценный продукт с уникальными свойствами и широким спектром применения, включая химическую, пищевую промышленность, сельское хозяйство, медицину и фармакологию, металлургию и строительство.

Некоторые авторы [9-11] указывают на то, что внесение в почвы глинистого материала, в частности, сапонитов, способствует повышению количества частиц тонкой пыли и ила, что увеличивает в ней долю физической глины и водопрочных агрегатов, а также способствует стабилизации фосфорного и азотного состояния питательного режима почвы. Сапонит-содержащие материалы могут быть использованы как агрохимикаты - мелиоранты и кальциево-магниевые удобрения при выращивании сельскохозяйственной продукции [12, 13]. При этом важно учесть их взаимодействие с питательными элементами в почве и вносимыми минеральными удобрениями (NPK). В настоящее время механизмы действия сапонитов в почве не изучены [6, 13].

Цель данного исследования – изучение сорбционных свойств сапонита по отношению к элементам питания растений (NO_3^- , K_2O) при его применении в качестве агрохимиката.

Методика и объекты исследования. В качестве объекта исследования сорбционных характеристик использовались образцы сапонита с АО «Севералмаз». Согласно протоколу испытаний, проведенных в испытательной лаборатории ФГБУ САС «Архангельская», сапонит-содержащие материалы, полученные при переработке алмазоносных пород в Архангельской области, имеют рН 7,8; содержат 2900 мг/кг подвижного фосфора, 350 мг/кг подвижного калия, 0,78 мг/кг нитратного азота и 5,6 мг/кг кальция. Присутствуют также химические элементы из группы тяжелых металлов. Их содержание в подвижной

форме: Cu – 0,18 мг/кг, Zn – 0,24 мг/кг, Ni – 4,4 мг/кг, Pb – 5,0 мг/кг и др., не превышающие по содержанию ПДК.

Было заложено два эксперимента. В первом эксперименте растворами заданной концентрации нитрата калия обрабатывали сухой сапонит и, в качестве сравнения, образец почвы. С этой целью была выбрана условно чистая дерново-подзолистая почва (верхний слой 0–20 см), отобранная в пригороде Архангельска. Данная почва относится к легкому суглинку по классификации Качинского с содержанием физической глины 28%, $pH_{\text{вод}}$ 4,6. В исходном образце почвы содержание нитратов составляло (70 ± 5) мг/кг, содержание ионов калия $(6,5 \pm 0,8)$ мг/кг. В опыте 1 г сапонита заливали 100 мл растворов с концентрациями KNO_3 : 0,1 моль/л (М), 0,01М, 0,001М, 0,0001М. Растворы встряхивали в течение 1 часа, фильтровали и в фильтрате определяли остаточную концентрацию нитратов и ионов калия согласно методике. Степень извлечения ионов определяли по формуле: $\alpha = ((C_{\text{исх.}} - C_{\text{ост.}}) / C_{\text{исх.}}) * 100\%$. Аналогично проводили измерения с почвой. Определение нитрат-ионов и ионов калия проводили ионометрическим методом по ГОСТ 26951-86 и ГОСТ 27753.6-88 соответственно.

Второй эксперимент проводили для оценки сорбционных характеристик сапонита в системе почва – сапонит. Для этого исследовали 3 типа почв: агрозем (окультуренная почва, применяемая для выращивания сельскохозяйственной продукции), дерново-подзолистую лесную почв и верховую торфяную. Предварительно в этих почвах было определено содержание анализируемых элементов. Некоторые характеристики исследуемых почв, которые могут влиять на сорбцию, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики тип почв используемые для анализа

Почва	pHвод.	Органическое вещество, %	Название почвы по гранулометрическому составу
Дерново-подзолистая	5,5	3,5	Суглинистая легкая
Агрозем	6,3	8,2	Супесчаная
Торфяная	3,6	2,3*	-

* - для торфяных почв определена зольность методом прокаливания.

Почву просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм, помещали в пластиковые контейнеры объемом 1,6 л. Опыт проводили с внесением максимальной дозы сапонита, рекомендуемой согласно ОВОС (50 т на 1 га). Сухой сапонит был внесен в почвы, тщательно перемешан. Почва была увлажнена (60 % от полной влагоемкости) и оставлена на экспозицию с поддержанием увлажнения в течение 1 месяца при перемешивании раз в неделю для установления равновесия в почвенно-поглощающем комплексе и общей структуре почв [7]. В качестве контроля анализировалась почва без внесения сапонита. Опыты проводили в трехкратной повторности с отбором средней пробы. В отобранных образцах проводили определение нитрат-ионов и ионов калия согласно ГОСТ 26951-86 и ГОСТ 27753.6-88 соответственно.

Результаты и обсуждение. Результаты первого эксперименты по сорбции нитрат-ионов и калия сухим сапонитом и почвой представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Содержание нитрат-ионов в вытяжках сапонита и почвы до и после проведения эксперимента

С (NO ₃ ⁻), моль/л в исходном растворе	Сапонит		Почва	
	С (NO ₃ ⁻), моль/л после сорбции	Степень сорбции α, %	С (NO ₃ ⁻), моль/л после сорбции	Степень сорбции α, %
0,1	0,03	70	*	-
0,01	0,001	90	0,08	-
0,001	0,0002	83	0,007	-
0,0001	*	*	0,0012	-

Примечание: *значение выходит за пределы градуировочного графика; знак «-» сорбция не происходит.

При анализе данных видно, что чистый сапонит сорбирует нитрат-ионы. И даже в области низких концентраций (10^{-4} М) наблюдается сорбция, так как остаточная концентрация нитратов ниже предела обнаружения метода. Степень извлечения составляет 70–90%. Аналогичный модельный опыт с почвой показал, что почва, наоборот, обогащает фильтрат нитрат-ионами. Сорбционных процессов не наблюдается.

Таблица 3 – Содержание ионов калия в вытяжках сапонита и почвы до и после проведенного эксперимента

С (K ⁺), моль/л в исходном растворе	Сапонит		Почва	
	С (K ⁺), моль/л после сорбции	Степень сорбции α , %	С (K ⁺), моль/л после сорбции	Степень сорбции α , %
0,1	0,04	60	0,09	10
0,01	0,007	30	0,011	-
0,001	0,0006	40	0,0009	10
0,0001	0,00012	-	0,0001	-

Примечание: знак «-» сорбция не происходит.

Анализ данных показал, что в области больших концентраций (10^{-1} - 10^{-3} М) происходит сорбция ионов калия сапонитом. Степень сорбции составляет 30–60%. Однако на области малых концентраций (0,0001 М) происходит противоположный процесс - обогащение раствора ионами калия, видимо за счет обменного калия в поглощенном состоянии в решетке сапонита. Тенденции в сорбировании калия почвой выявить не удалось, так как в половине случаев отмечается незначительное извлечение калия (в пределах 10 %), равно как и несущественное обогащение раствора, сопоставимые с погрешностью метода.

Однако вопрос изучения сорбционных свойств важно рассматривать не только на примере чистого сапонита, но также и в системе почва-сапонит. При совместном присутствии возможны проявления новых эффектов взаимодействия. Второй эксперимент, поставленный на

внесении сапонита в систему различных почв, позволит выявить специфику этого взаимодействия.

Содержание нитрат-ионов в почвах с сапонитом и без сапонита в экстрагируемом растворе и степень сорбции (α) нитрат-ионов и калия в опытах представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Степень сорбции нитрат-ионов в системе почва-сапонит

Почва	С KNO ₃ , моль/л	Почва		Почва+сапонит	
		С _{ост.} NO ₃ ⁻ после сорбции, моль/л	Степень сорбции α , %	С _{ост.} NO ₃ ⁻ после сорбции, моль/л	Степень сорбции α , %
Торфяная	0,1	0,08	20	0,03	70
	0,01	0,009	10	0,005	50
	0,001	0,0006	40	0,0006	40
	0,0001	0,0001	-	0,0009	-
Дерново-подзолистая	0,1	0,07	30	0,063	37
	0,01	0,006	40	0,008	20
	0,001	0,001	-	0,0015	-
	0,0001	0,008	-	0,00007	-
Агрозем	0,1	0,049	51	0,06	40
	0,01	0,005	50	0,006	40
	0,001	0,007	-	0,0014	-
	0,0001	0,003	-	0,0019	-

Примечание: знак «-» сорбция не происходит.

На всех типах почв сорбция нитратов отмечается только в области больших концентраций (выше 10⁻³ моль/л). При этом внесение сапонита в большей степени повышает сорбционные свойства торфа – степень сорбции увеличивается на 40-50%. Для минеральных почв (дерново-подзолистой почвы и агрозема) добавление сапонита даже в области больших концентраций незначительно снижает сорбционные процессы. Однако незначительная разница в степени сорбции (около 10%) нитратов и калия в системе почва-сапонит и «чистой» почвы не позволяет говорить о значимом влиянии сапонита на фиксацию этих элементов.

Аналогично сорбции нитрат-ионов, сорбция ионов калия обнаруживается только в области больших концентраций (10⁻¹ – 10⁻²) моль/л. При этом значимая разница в степени сорбции проявляется только

для торфяной почвы – степень сорбции снижается в 2 раза. Для минеральных почв добавка сапонита к появлению существенной разницы не приводит.

Таблица 5 – Степень сорбции ионов калия в системе почва-сапонит

Почва	С KNO ₃ , моль/л	Почва		Почва+сапонит	
		Остаточная концентрация K ⁺ после сорбции, моль/л	α, %	Остаточная концентрация K ⁺ после сорбции, моль/л	α, %
Торфяная	0,1	0,02	80	0,06	40
	0,01	0,006	40	0,008	20
	0,001	0,0008	20	0,01	-
	0,0001	0,0001	-	0,0008	-
Дерново-подзолистая	0,1	0,007	93	0,01	90
	0,01	0,002	80	0,002	80
	0,001	0,0002	80	0,001	-
	0,0001	0,005	-	0,001	-
Агрозем	0,1	0,01	90	0,009	91
	0,01	0,003	70	0,002	80
	0,001	0,005	-	0,006	-
	0,0001	0,001	-	0,004	-

Примечание: знак «-» сорбция не происходит.

Таким образом, внесение сапонита на минеральных почвах (дерново-подзолистой и агроземе) в дозе 50 т/га не требует дополнительного введения азотных и калийных удобрений, так как не обнаруживается существенная разница между степенью сорбции в почве и в системе почва-сапонит. Однако внесение сапонита на торфяных почвах может предполагать увеличение доз внесения азотных удобрений, содержащих нитрат-ионы, так как в области больших концентраций сапонита увеличивается степень сорбции на 40-50%. На внесение калийных удобрений в торфяную почву добавка сапонита может оказать влияние также в случае его высоких концентраций в сторону снижения дозировки удобрения.

Заключение. Таким образом, сухой сапонит сорбирует нитрат-ионы со степенью сорбции 70-90%, а сорбция ионов калия наблюдается только в области больших концентраций (10^{-1} - 10^{-3} М) и составляет 30–60%. Однако при внесении сапонита в почву в максимальной концентрации, указанной в ОВОС, где сапонит рассматривается в качестве агрохимиката, сорбция нитрат-ионов и ионов калия отмечается только в области высоких концентраций. При этом внесение сапонита в большей степени повышает сорбционные свойства торфяной почвы по отношению к нитрат-ионам и снижает их по отношению к ионам калия. Для минеральных почв – агрозема супесчаного и лесной дерново-подзолистой почвы (легкосуглинистой), существенного влияния на сорбционные свойства добавка сапонита не оказывает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advanced Techniques of Saponite Recovery from Diamond Processing Plant Water and Areas of Saponite Application / V.A. Chanturiya, V.G. Minenko, D.V.Makarov, O.V. Suvorova, E. A. Selivanova // Minerals 2018. 8. P. 549. <https://doi.org/10.3390/min8120549>
2. Доклад. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2023 год / отв. ред. Э.В. Шашин; ГБУ Архангельской области «Центр природопользования и охраны окружающей среды». 2024. 505 с.
3. Влияние сапонитсодержащих материалов на плодородие почв и урожайность однолетних полевых трав после первого года внесения / Е. М. Романов, Е. Н. Наквасина, Е. Н. Косарева, Е. Н. Шабанова // Агрохимический вестник. 2019. № 6. С. 42–46.
4. The Effect of Saponite Clay on Ruminant Fermentation Parameters during In Vitro Studie / Pikhtirova, A.; Pecka-Kiełb, E.; Króliczewska, B.; Zachwieja, A.; Króliczewski, J.; Kurczyński, R. // Animals 2024, 14, 738. <https://doi.org/10.3390/ani14050738>
5. Облицов А. Ю., Рогалев В. А. Перспективные направления утилизации отходов обогащения алмазоносной породы месторождения имени М. В. Ломоносова // Записки Горного института. 2012. № 165. С. 163-167.
6. Mechanochemically activated saponite as materials for Cu²⁺ and Ni²⁺ removal from aqueous solution / L. Petra [et all.] // Applied Clay Science 2017. Iss. 143. DOI : 10.1016/j.clay.2017.03.012.
7. Synthesis and thermal decomposition of metal hydroxide intercalated saponite / N. Nityashre [et all.] // Applied Clay Science. 2014. Iss. 87. DOI : 10.1016/j.clay.2013.10.026.
8. A high capacity bentonite clay for the sorption of aflatoxins / Wang, M.; Heaton, S.E.; Phillips, T.D. // Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess. 2020. 37. P. 332–341

9. Harley A.D., Gilkes R.J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2000. 56. P. 11–36.

10. Козлов А.В., Куликова А.Х., Уромова И.П. Физико-химические свойства бентонита и его влияние на кислотно-основные показатели и эффективное плодородие дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019;(96):86-112. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-86-112>

11. Наквасина Е.Н., Романов Е.М., Шабанова Е.Н., Косарева Е.Н., Кононов О.Д. Применение сапонит-содержащих материалов в качестве минерального удобрения при выращивании картофеля в Архангельской области // *Вестник КрасГАУ*. 2019. №1. С 60-68.

12. Босак В.Н. Применение сапонитсодержащего базальтового туфа при возделывании овощных культур / В.Н. Босак, Т.В. Сачивко // *Вестник БарГУ. Серия: биологические науки. Сельскохозяйственные науки*. - 2017. Вып. 5. С. 83-88.

13. Зубкова О.С. Исследования сорбционных способностей сапонитового глинистого минерала по отношению к ионам Cu^{2+} / О.С. Зубкова, М.А. Торопчина, К.А. Панкратьева // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки*. 2023. № 1. С. 49–56.

References

1. Advanced Techniques of Saponite Recovery from Diamond Processing Plant Water and Areas of Saponite Application / V.A. Chanturiya, V.G. Minenko, D.V.Makarov, O.V. Suvorova, E. A. Selivanova // *Minerals* 2018. 8. P. 549. <https://doi.org/10.3390/min8120549>

2. Doklad. Sostojanie i ohrana okruzhajushhej sredy Arhangel'skoj oblasti za 2023 god / otv. red. Je.V. Shashin; GBU Arhangel'skoj oblasti «Centr prirodopol'zovanija i ohrany okruzhajushhej sredy». 2024. 505 s.

3. Vlijanie saponitsoderzhashchih materialov na plodorodie pochv i urozhajnost' odnoletnih polevyh trav posle pervogo goda vnesenija / E. M. Romanov, E. N. Nakvasina, E. N. Kosareva, E. N. Shabanova // *Agrohimicheskij vestnik*. 2019. № 6. S. 42–46.

4. The Effect of Saponite Clay on Ruminal Fermentation Parameters during In Vitro Studie / Pikhtirova, A.; Pecka-Kiełb, E.; Króliczewska, B.; Zachwieja, A.; Króliczewski, J.; Kupczyński, R. // *Animals* 2024, 14, 738. <https://doi.org/10.3390/ani14050738>

5. Oblicov A. Ju., Rogalev V. A. Perspektivnye napravlenija utilizacii othodov obogashhenija amazonosnoj porody mestorozhdenija imeni M. V. Lomonosova // *Zapiski Gornogo instituta*. 2012. № 165. S. 163-167.

6. Mechanochemically activated saponite as materials for Cu^{2+} and Ni^{2+} removal from aqueous solution / L. Petra [et all.] // *Applied Clay Science* 2017. Iss. 143. DOI : 10.1016/j.clay.2017.03.012.

7. Synthesis and thermal decomposition of metal hydroxide intercalated saponite / N. Nityashre [et all.] // *Applied Clay Science*. 2014. Iss. 87. DOI : 10.1016/j.clay.2013.10.026.

8. A high capacity bentonite clay for the sorption of aflatoxins / Wang, M.; Hearon, S.E.; Phillips, T.D. // *Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess*. 2020. 37. P. 332–341

9. Harley A.D., Gilkes R.J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2000. 56. P. 11–36.

10. Kozlov A.V., Kulikova A.H., Uromova I.P. Fiziko-himicheskie svojstva bentonita i ego vlijanie na kislotno-osnovnye pokazateli i jeffektivnoe plodorodie dernovo-podzolistoj legkosuglinistoj pochvy. Bjuulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva. 2019;(96):86-112. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-86-112>

11. Nakvasina E.N., Romanov E.M., Shabanova E.N., Kosareva E.N., Kononov O.D. Primenenie saponit-soderzhashhih materialov v kachestve mineral'nogo udobrenija pri vyrashhivanii kartofelja v Arhangel'skoj oblasti // Vestnik KrasGAU. 2019. №1. S 60-68.

12. Bosak V.N. Primenenie saponitsoderzhashhego bazal'tovogo tufa pri vzdelyvanii ovoshhnyh kul'tur / V.N. Bosak, T.V. Sachivko // Vestnik BarGU. Serija: biologicheskie nauki. Sel'skohozjajstvennye nauki. - 2017. Vyp. 5. S. 83-88.

13. Zubkova O.S. Issledovaniya sorbcionnyh sposobnostej saponitovogo glinistogo minerala po otnosheniju k ionam Cu^{2+} / O.S. Zubkova, M.A. Toropchina, K.A. Pankrat'eva // Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. tehn. nauki. 2023. № 1. S. 49–56.