

Использование отработанного активного ила для очистки сточных вод, загрязнённых тяжёлыми металлами

© 2020. Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор, в. н. с., С. Г. Скугорева², к. б. н., н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
С. Ю. Огородникова^{2,3}, к. б. н., с. н. с., Л. В. Кондакова^{2,3}, д. б. н., профессор, с. н. с.,
Е. О. Великородчанина¹, магистр, А. В. Короткова¹, магистр,
А. Л. Ковина¹, к. б. н., доцент,

¹Вятская государственная сельскохозяйственная академия,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: dli-alga@mail.ru

В статье рассмотрены возможности использования активного ила (АИ) в качестве сорбента тяжёлых металлов (ТМ) и стимулятора роста непригодных растений на примере люпина узколистного *Lupinus angustifolius* L.

Согласно данным хроматографического анализа, в надосадочной жидкости АИ содержатся в больших концентрациях ионы натрия, хлорид-, сульфат- и нитрат-ионы. Максимальная численность микроорганизмов (МО) надосадочной жидкости АИ характерна для эукариотов (микромикетов), доля которых составляет 50,4%. Численность прокариотных МО в структуре микробных популяций колеблется от 13,8 до 19,1%. Среди фототрофов доминируют цианобактерии, зелёные водоросли и диатомеи.

Сухая масса АИ является хорошим сорбентом по отношению к ионам Cu^{2+} и Pb^{2+} , превосходя по показателям сорбции традиционный сорбент – активированный уголь. При этом по отношению к ионам Pb^{2+} сорбционная ёмкость АИ была несколько выше по сравнению с ионами Cu^{2+} . Скорость сорбции АИ в разведении 1:100 до 4 раз выше, чем без разведения.

Использование АИ приводило к заметному увеличению индекса роста люпина узколистного, при этом максимальный эффект (в 2 раза) отмечали при разведении 1:100. Также происходило снижение интенсивности окислительных процессов как в корнях, так и в надземных органах люпина, что свидетельствует о системном действии АИ. В большей степени антиоксидантные свойства проявлял АИ в разведениях, с увеличением разведения интенсивность процессов перекисного окисления липидов в клетках люпина снижалась.

Таким образом, АИ, особенно в разведении 1:100, является хорошим сорбентом ТМ, стимулятором роста люпина узколистного, приводя к усилению его антиоксидантной активности. В связи с этим использование отработанного АИ может быть весьма перспективным при выращивании декоративных культур на почвах, загрязнённых ТМ.

Ключевые слова: активный ил, сорбция, тяжёлые металлы, люпин узколистный, индекс роста, перекисное окисление липидов.

The use of waste activated sludge for the treatment of waste water contaminated with heavy metals

© 2020. L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337, S. G. Skugoreva² ORCID: 0000-0002-5902-5187,
T. Ya. Ashikhmina^{2,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047, S. Yu. Ogorodnikova^{2,3} ORCID: 0000-0001-8865-4743,
L. V. Kondakova^{2,3} ORCID: 0000-0002-2190-686X, E. O. Velikoredchanina¹ ORCID: 0000-0001-7263-6612,
A. V. Korotkova¹ ORCID: 0000-0001-7292-7655, A. L. Kovina¹ ORCID: 0000-0003-0503-3402

¹Vyatka State Agricultural Academy,

133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

³Vyatka State University,

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

e-mail: dli-alga@mail.ru

The article considers the possibilities of using activated sludge (AS) as a sorbent of heavy metals (HM) and a growth stimulator for non-food plants using the example of narrow-leaved lupine *Lupinus angustifolius* L.

According to chromatographic analysis, the AS supernatant contains sodium, chloride, sulfate and nitrate ions in high concentrations. The maximum abundance of microorganisms (MO) in the AS supernatant is characteristic for eukaryotes (micromycetes), whose share is 50.4%. The number of prokaryotic MO ranges from 13.8 to 19.1% in the structure of microbial populations. Among the phototrophs, cyanobacteria, green algae and diatoms dominate.

The dry mass of AS is a good sorbent with respect to copper(II) and lead(II) ions, surpassing the traditional sorbent – activated carbon – in terms of sorption. At the same time, in relation to lead ions, the sorption capacity of AS was slightly higher compared to copper ions. The rate of sorption by AS in a dilution of 1:100 is up to 4 times higher than without dilution.

The use of AS led to a significant increase in the narrow-leaved lupine growth index, while the maximum effect (2 times) was observed at a dilution of 1:100. There was also a decrease in the intensity of oxidative processes both in the roots and in the aboveground organs of lupine, which indicates a systemic effect of AS. AS in dilutions exhibited antioxidant properties to a greater extent; with an increase in dilution, the intensity of lipid peroxidation processes in lupine cells decreased.

Thus, AS, especially at a 1:100 dilution, is a good sorbent of HM, a stimulator of the growth of narrow-leaved lupine, leading to an increase in its antioxidant activity. In this regard, the use of waste AS can be very promising when growing ornamental crops on soils contaminated with HM.

Keywords: activated sludge, sorption, heavy metals, narrow-leaf lupine, growth index, lipid peroxidation.

Активный ил (АИ) биологических очистных сооружений, осуществляющий в аэротенках процесс очистки сточных вод в аэробных условиях, представляет собой сообщество микроорганизмов (МО) различных систематических групп (фото- и гетеротрофных бактерий, водорослей, микромицетов), а также некоторых мелких беспозвоночных. Это искусственно созданная экосистема, смесь биомассы МО и загрязняющих веществ, поступающих в аэротенк вместе со сточными водами. Активный ил представляет собой тёмно-коричневые хлопья размером до нескольких сотен микрометров. На 70% он состоит из живых организмов и на 30% – из твёрдых частиц неорганической природы [1–3].

Существуют различные варианты дальнейшего использования отработанного АИ. В частности, предлагают использовать осадок сточных вод целлюлозно-бумажного производства, содержащий в своём составе целлюлозное волокно и АИ, в качестве добавки при производстве композитных материалов теплоизоляционных плит и выгорающей добавки при производстве керамического кирпича [4]. Предлагается и такой путь использования АИ, как приём биологической рекультивации почв, загрязнённых ароматическими аминами [5].

Одним из перспективных вариантов дальнейшего использования АИ является его применение в качестве биосорбента по отношению к различным поллютантам, в том числе к тяжёлым металлам (ТМ). В работе [6] показано, что высокая сорбционная способность АИ может значительно усиливаться при интродукции в него микроорганизмов-деструкторов. Как отмечалось нами ранее [7],

в процессе извлечения ТМ из загрязнённых сточных вод изучение кинетики сорбции имеет большое значение для выбора оптимальных условий осуществления водоочистки, так как оно позволяет получить важную информацию о пути и механизме сорбции.

Цель данной работы – изучить возможность использования активного ила как сорбента тяжёлых металлов при очистке загрязнённых сточных вод, а также в качестве стимулятора роста неприщевых растений.

Объекты и методы исследования

В работе использован АИ из очистных сооружений ООО «Коммунальщик», расположенных в г. Кирове. В качестве тест-организма выбрано однолетнее бобовое растение люпин узколистный (*Lupinus angustifolius* L.).

При анализе АИ определяли такие его составляющие, как ионный состав надосадочной жидкости; численность различных групп МО; видовой состав водорослей и цианобактерий (ЦБ).

Содержание неорганических ионов в надосадочной жидкости определяли методом ионной хроматографии на хроматографе «Стайер», водородный показатель измеряли на рН-метре-иономере «Эксперт-001», электропроводность – на кондуктометре «Cond 340i» [8].

Численность различных физиологических групп МО выявляли в высевах предельных разведений на селективные питательные среды: агаризованный гидролизат рыбной муки (ГРМ) – для аммонификаторов; крахмало-аммиачный агар (КАА) – для актинобактерий; Эшби – для азотфиксаторов; Чапека – для микромицетов.

Видовой состав водорослей и ЦБ определяли прямым микроскопированием биоплёнок, развившихся на поверхности АИ и в надосадочной жидкости. Идентификацию видового состава альго-цианофлоры проводили с использованием ряда выпусков отечественных и зарубежных определителей. Названия водорослей и ЦБ приведены по базе данных Algaebase (<http://www.algaebase.org>).

Перед проведением эксперимента по сорбции ионов ТМ АИ высушивали до постоянной массы, измельчали. Измерение содержания ионов Cu^{2+} и Pb^{2+} в растворе проводили потенциометрическим методом на иономере «Эксперт-001» с ионоселективными электродами. В стакан наливали 50 мл раствора нитрата меди(II) или свинца(II) с концентрацией $1 \cdot 10^{-4}$ М, погружали в раствор магнит, ионоселективный и рН-электроды, двухключевой электрод сравнения, включали мешалку. Пробы сухого АИ взвешивали, вносили в стакан с раствором соли и записывали кривые изменения потенциала электрода с течением времени [7, 9].

При описании кинетики сорбции использовали модели псевдо-первого и псевдо-второго порядков, модифицированную модель второго порядка и модель Еловича [10–11]. Значения параметров кинетических моделей сорбции, усреднённые за полное время каждого измерения, были найдены методом наименьших квадратов при помощи надстройки «Поиск решения» программного пакета Microsoft Office Excel.

В опытах с люпином узколистным использовали рулонный метод. В ходе эксперимента были использованы следующие варианты: 1 – контроль (артезианская вода); 2 – АИ без разведения; 3 – АИ в разведении 1:10 (25 мл АИ + 225 мл воды); 4 – АИ в разведении 1:100 (2,5 мл АИ + 247,5 мл воды).

Опыт проводили в четырёхкратной повторности в контейнерах, на дно которых наливали испытуемую жидкость слоем 2,5 см (250 мл). В каждой повторности на полоски фильтровальной бумаги раскладывали по 15 семян люпина. Опыт снимали через 7 сут, определяя такие параметры состояния растений, как всхожесть, длину корней, высоту проростков, их соотношение, индекс роста по формуле:

$$I = (R + P) \cdot D, \quad (1)$$

где I – индекс роста, R – суммарное значение длин корней (мм), P – суммарное значение

длин проростков (мм), D – доля проросших семян (%) [12].

В листьях и корнях 7-дневных растений люпина изучали интенсивность процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ). Интенсивность ПОЛ определяли по накоплению в тканях малонового диальдегида (МДА), который образует окрашенный комплекс с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) [13]. Навеску сырой ткани массой 0,6 г гомогенизировали в 10 мл среды выделения (0,1 М трис-НСI буфер рН = 7,6, содержащий 0,35 М NaCl). К 3 мл гомогената добавляли 2 мл 0,5% ТБК в 20% трихлоруксусной кислоте, инкубировали в кипящей водяной бане в течение 30 мин. Оптическую плотность фильтратов определяли при длине волны 532 нм на спектрофотометре SPEKOL 1300 (Analytik Jena, Германия).

Концентрацию МДА рассчитывали по формуле:

$$C = D / (\varepsilon \cdot l), \quad (2)$$

где C – концентрация МДА, нмоль/г сырой массы; ε – коэффициент молярной экстинкции $1,56 \cdot 10^5$ см; l – толщина слоя раствора в кювете.

Результаты и обсуждение

Ионный состав надосадочной жидкости.

Надосадочная жидкость АИ имела слабощелочную реакцию среды (7,7 ед.) (табл. 1). Её электропроводность была достаточно велика (8600 мкСм/см), что может быть обусловлено большими значениями концентраций неорганических ионов. Хроматографический анализ жидкости показал, что в ней содержатся ионы натрия, хлорид-, сульфат- и нитрат-ионы в концентрациях, превышающих ПДК для воды культурно-бытового и хозяйственно-питьевого назначения в 1,4–9,3 раза (ГН 2.1.5.1315-03).

Численность микроорганизмов. Микробиологический анализ показал, что в надосадочной жидкости АИ максимальная численность характерна для эукариотов (микромитозов), доля которых составляет 50,4%. Численность исследуемых прокариотных МО приблизительно одинакова и составляет в структуре микробных популяций от 13,8 до 19,1% (табл. 2).

Флористический анализ АИ выявил, что среди фототрофов доминируют безгетероцистные ЦБ: *Leptolyngbya foveolarum*, *L. angustissima*, *L. fragilis*, *Phormidium boryanum*; из

Таблица 1 / Table 1

Ионный состав надосаточной жидкости / Ionic composition of the supernatant

Показатели Indexes		Значения Values	Норматив для воды (ГН 2.1.5.1315-03) Water standard (GN 2.1.5.1315-03)
рН, ед. / units		7,7±0,1	6,0–9,0
Электропроводность, мкСм/см Conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$		8600±400	–
Концентрация ионов, мг/л The concentration of ions, mg/L	K ⁺	28±4	–
	Mg ²⁺	49±5	50
	Ca ²⁺	158±16	–
	Na ⁺	1860±280*	200
	Cl ⁻	1820±180*	350
	NO ₃ ⁻	62±9*	45
	SO ₄ ²⁻	1450±220*	500

Примечание: прочерк обозначает отсутствие норматива по данному показателю; * – значения, превышающие ПДК.
Note: a dash indicates the absence of a standard for this indicator; * – values exceeding the maximum permissible concentration.

Таблица 2 / Table 2

Численность и содержание микроорганизмов надосаточной жидкости активного ила
The number and content of microorganisms in the supernatant of activated sludge

Группа микроорганизмов Microorganism group	Численность, тыс. КОЕ/мл Number, thousand CFU/mL	Содержание (%) Content (%)
Аммонификаторы / Ammonifiers	102,0±4,5	19,1
Азотфиксаторы / Nitrogen fixers	74,0±2,6	13,8
Актинобактерии / Actinobacteria	89,5±6,4	16,7
Микромицеты / Micromycetes	268,6±0,0	50,4

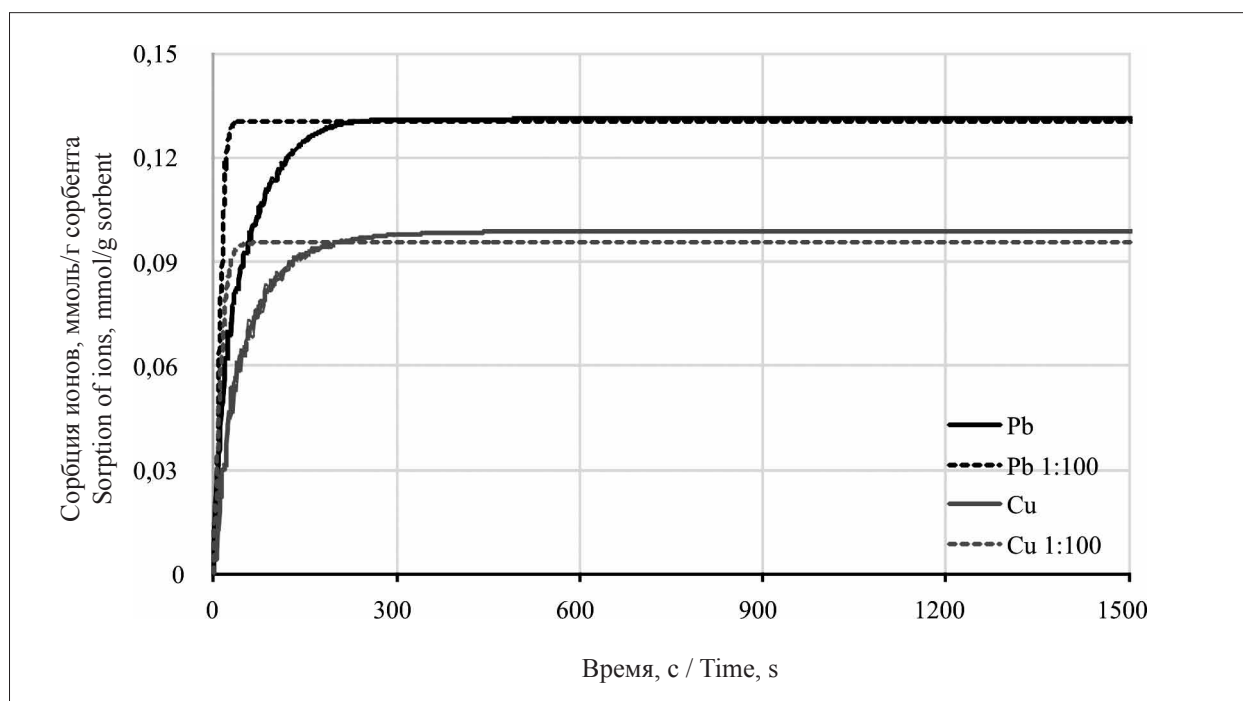


Рис. 1. Экспериментальные кривые сорбции Cu²⁺ и Pb²⁺ активным илом из растворов
Fig. 1. Experimental sorption curves of Cu²⁺ and Pb²⁺ by activated sludge from solutions

гетероцистных ЦБ отмечены *Nostoc paludosum*, *Cylindrospermum* sp. На завершающей стадии сукцессии данные виды образуют достаточно плотную биоплёнку, в которой также обнаружены зелёные водоросли (*Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Keratococcus bicaudatus*, *Scenedesmus caudricauda*, *S. acuminatus*) и диатомеи (*Navicula* sp., *Nitzshia palea*).

Таким образом, исследуемый АИ и надосадочная жидкость содержат различные группы прокариотных и эукариотных МО, включая фотосинтетиков (водоросли и ЦБ) и сапрофитных и фотосинтезирующих азотфиксаторов (бактерии на среде Эшби и гетероцистные ЦБ).

Известно, что отдельные представители данных микробных группировок обладают сорбционной активностью, способны выделять широкий круг биологически активных веществ, но, в тоже время, среди микромицетов встречаются фитопатогенные и токсигенные формы.

Поэтому в дальнейшей работе оценивали сорбционные способности АИ по отношению к ТМ и его действие на рост и развитие высшего растения на примере люпина узколистного.

Сорбционные возможности активного ила по отношению к ионам тяжёлых металлов. В ходе работы были построены кривые сорбции ионов Cu^{2+} и Pb^{2+} АИ из растворов солей ТМ (рис. 1). Из рисунка 1 видно, что сорбция ионов ТМ сухим АИ происходила достаточно быстро: менее чем через 300 с (5 мин) значения сорбции выходили на «плато». При этом, способность к сорбции Pb^{2+} у АИ была более выражена по сравнению с Cu^{2+} .

Для количественной оценки сорбционной способности АИ использовали кинетические модели сорбции. Подбор модели кинетики сорбции осуществляли по наибольшему значе-

нию коэффициента детерминации r^2 (табл. 2). Максимальные значения r^2 (0,96–0,991) установлены для модели псевдо-первого порядка, согласно которой сорбции предшествует диффузия, лимитирующей является стадия химической реакции.

Сравним параметры сорбции ионов ТМ различными вариантами АИ по модели псевдо-первого порядка (рис. 2). Равновесная удельная масса сорбата (a_0) является показателем сорбционной ёмкости. По отношению к ионам свинца сорбционная ёмкость АИ выше в 1,4–1,6 раза по сравнению с Cu^{2+} , что согласуется с данными литературы [14]. Различия между АИ без разведения и с разведением 1:100 незначительны (3–15%). Сорбционная ёмкость АИ по отношению к ионам свинца выше в 1,3–1,6 раза, чем для сухого мицелия микромицетов р. *Fusarium*, к Cu^{2+} – различия сорбентов не существенны [9]. Если сравнивать ёмкость сорбции ионов Cu^{2+} другими сорбентами, то для АИ она в 1,1–1,5 раза ниже, чем для торфа, сухой биомассы ЦБ *N. paludosum*, листьев и корней ячменя, но выше, чем для традиционного сорбента – активированного угля [7].

Кинетический коэффициент служит показателем скорости сорбции. Согласно полученным данным, скорости сорбции Cu^{2+} и Pb^{2+} мало отличаются друг от друга (1–17%). Установлено, что скорость сорбции АИ в разведении 1:100 в 3,5–4,0 раза выше, чем без разведения. Скорость сорбции АИ превышает таковую для большинства изученных сорбентов, за исключением ячменя и фузариума [7, 9].

В ходе сорбции ионов ТМ сухим АИ достаточно сильно возрастал водородный показатель раствора: от 5,5 до 7,5–8,1 ед. (рис. 3). Скорость изменения рН была выше для АИ

Таблица 3 / Table 3

Соответствие различных моделей химической кинетики экспериментальным данным по сорбции Cu^{2+} и Pb^{2+} (по величине r^2) / Correspondence of various models of chemical kinetics to experimental data on sorption of Cu^{2+} and Pb^{2+} (in terms of r^2)

Варианты сорбентов Variants of sorbents	Модель псевдо-первого порядка Pseudo-first order model	Модель псевдо-второго порядка Pseudo-second order model	Модифицированная модель второго порядка Modified model of second order	Модель Еловича Elovich's model
Cu	0,992*	0,96	0,96	0,66
Cu 1:100	0,991*	0,88	0,88	0,38
Pb	0,97*	0,96	0,96	0,65
Pb 1:100	0,96*	0,83	0,83	0,33

Примечание: * – максимальные значения.
Note: * – maximal values.

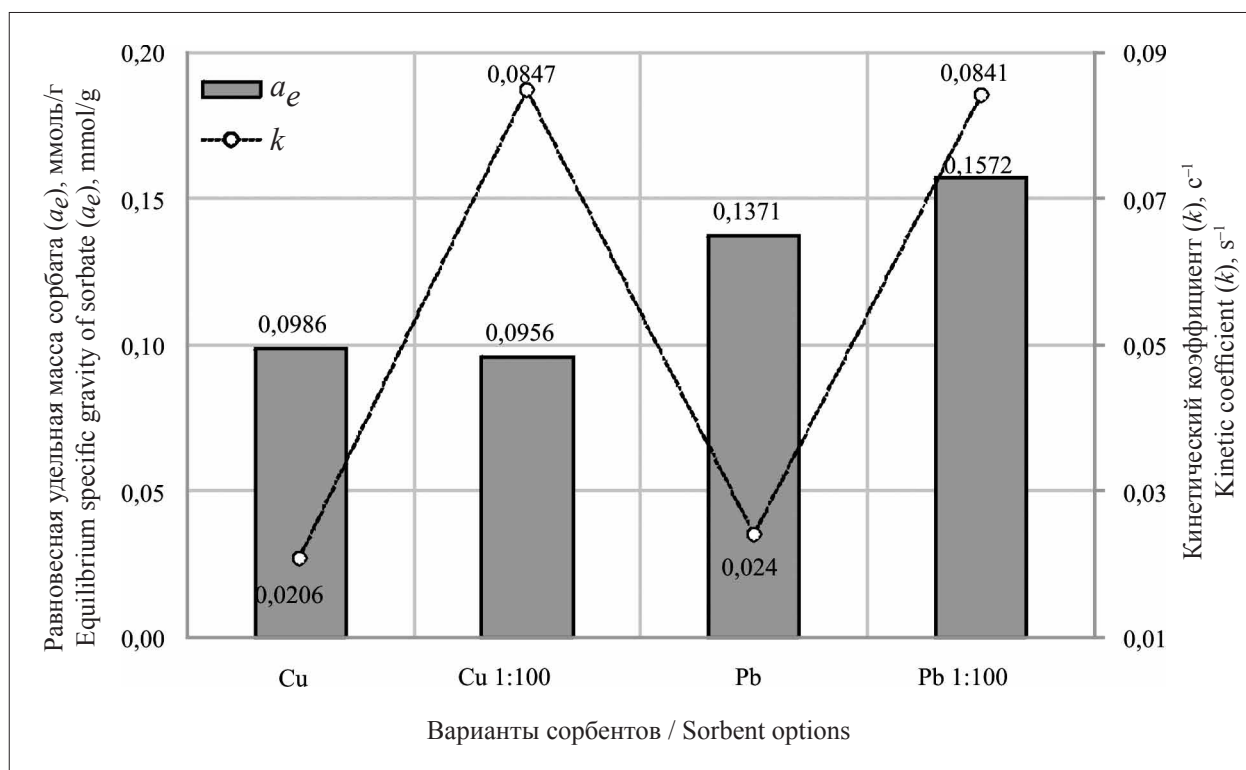


Рис. 2. Параметры модели псевдо-первого порядка сорбции активным илом ионов Cu^{2+} и Pb^{2+}
 Fig. 2. Parameters of the model of pseudo-first order sorption of Cu^{2+} and Pb^{2+} ions by activated sludge

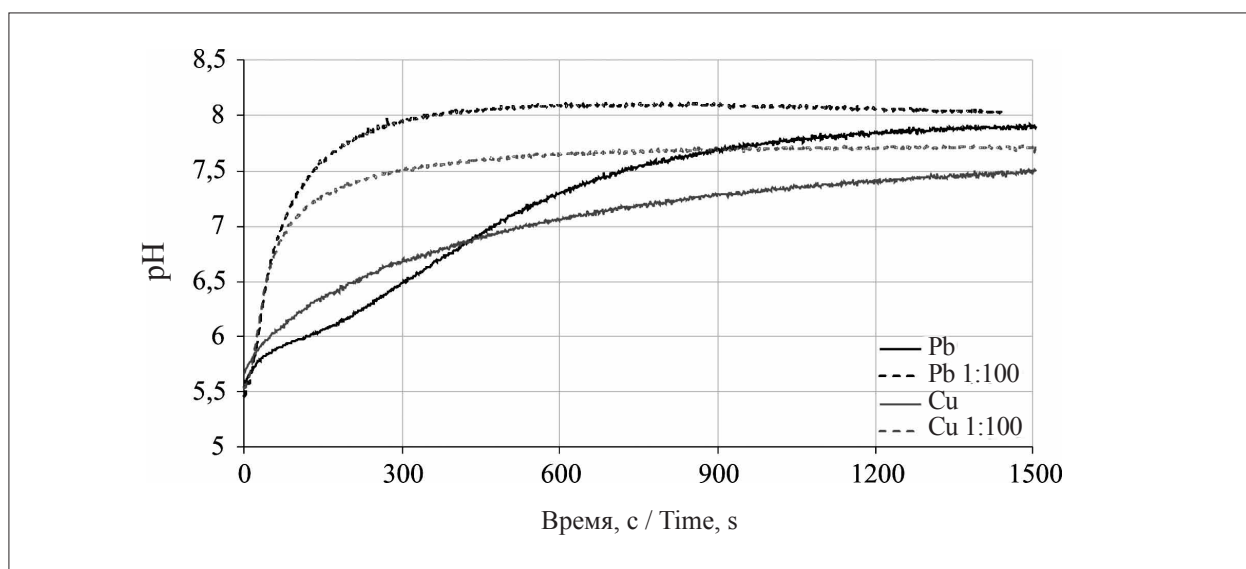


Рис. 3. Кинетика изменения pH в ходе сорбции ионов ТМ активным илом
 Fig. 3. Kinetics of pH changes during sorption of ions HM by activated sludge

в разведении 1:100. При этом между изменением концентрации протонов и ионов ТМ в растворе существует очень высокая корреляционная связь ($r = 0,97-0,996$). Вероятно, что механизм сорбции – ионообменный, вследствие этого процесса прямо пропорционально увеличивается pH раствора, т. е. снижается концентрация протонов. Данный факт был

установлен нами ранее, при изучении сорбции ионов ТМ микромицетами рода *Fusarium* [9].

Влияние активного ила на рост и развитие люпина узколистного. Определение биометрических показателей люпина узколистного показало, что использование АИ без разведения и с разведением 1:10 и 1:100 привело к значительному увеличению индекса

Таблица 4 / Table 4

Влияние активного ила на рост и развитие люпина узколистного
The effect of activated sludge on the growth and development of narrow-leaved lupine

Вариант Variant		Всхожесть, % Germination, %	Длина корня, см Root length, cm	Высота, см Height, cm	Индекс роста Growth index
Контроль / Control		81,7±11,3	0,2±0,5	5,7±1,6	629
АИ AS	без разведения without dilution	80,0±5,5	2,6±0,3	5,6±1,1	656
	разведение dilution	1:10	4,4±0,7*	9,3±1,5*	1075*
		1:100	95,0±6,3*	5,1±0,6*	8,3±0,2*

Примечание: АИ – активный ил; * – максимальные показатели.
Note: AS – activated sludge; * – maximum values.

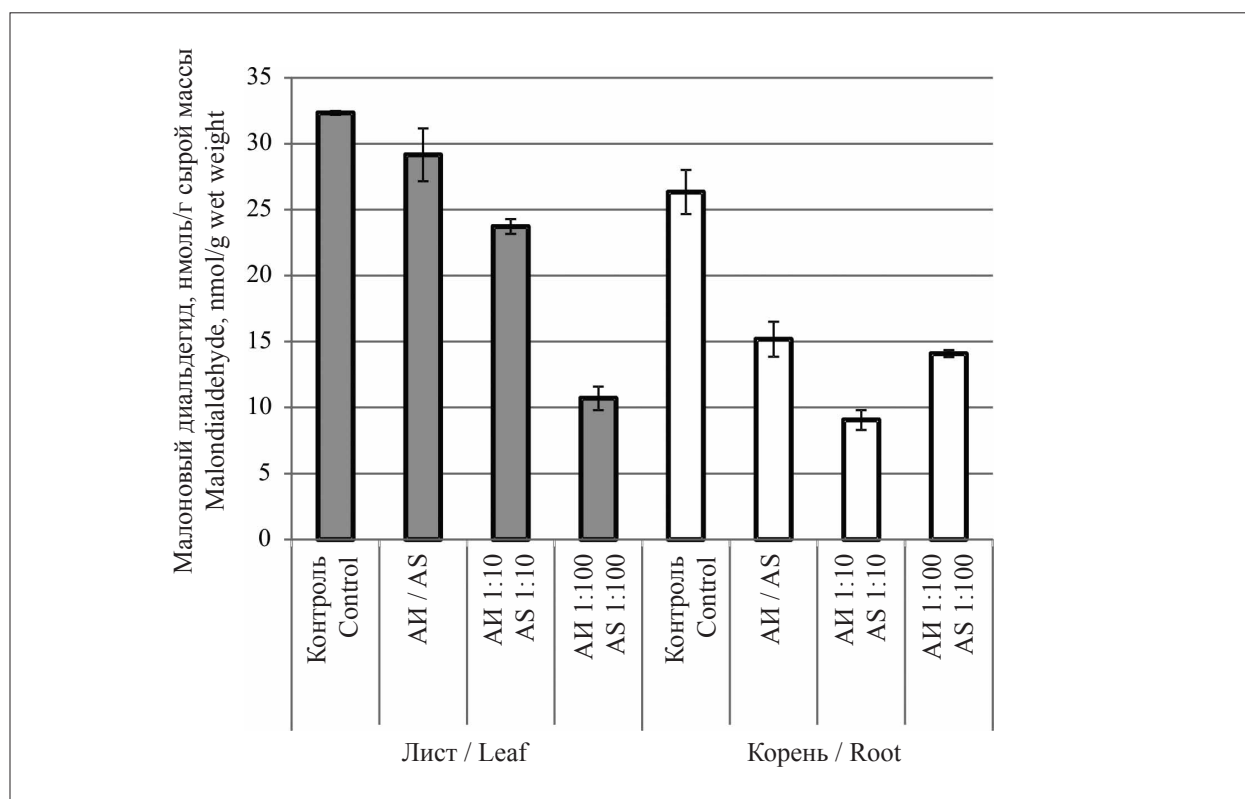


Рис. 4. Содержание МДА в листьях и корнях люпина, нмоль/г сырой массы
Fig. 4. MDA content in the leaves and roots of lupine, nmol/g wet weight

роста, максимальному (в два раза) в варианте с разведением 1:100 (табл. 4).

Ростстимулирующее действие АИ было выявлено и другими авторами в опытах на растениях ячменя и бобовых [15, 16]. Результаты по росту и развитию люпина узколистного хорошо коррелируют с данными, полученными при определении содержания МДА (рис. 4).

Выращивание люпина в присутствии АИ приводило к снижению интенсивности окислительных процессов в растительных клетках. В большей степени антиоксидантные свойства проявлял АИ в разведениях, с увеличением разведения АИ интенсивность процессов ПОЛ в клетках люпина снижалась. Происходило

уменьшение накопления МДА как в корнях, которые непосредственно контактировали с АИ, так и в надземных органах, что свидетельствует о системном действии АИ на растения люпина.

Определённый уровень МДА в клетках является результатом активности как ферментативных, так и неферментативных защитных систем в клетке [17]. Показана активация антиоксидантных ферментов и снижение накопления МДА в растениях люцерны, которые выращивали в присутствии АИ [18, 19].

Снижение интенсивности процессов ПОЛ в клетках люпина может быть связано с поступлением веществ с антиоксидантной

активностью, входящих в состав АИ. Антиоксидантное действие на растения люпина могут оказывать экзометаболические МО. Известно, что в составе экзометаболических ЦБ присутствуют вещества с выраженными антиоксидантными свойствами – ликопин, лютеин, витамин А и др. [20, 21].

Активный ил оказывает положительное действие на биохимические показатели и рост растений люпина. Выявлена сильная отрицательная корреляция между показателями роста и содержанием МДА в корнях ($r = -0,89$). Для надземных органов связь между интенсивностью ПОЛ и линейным ростом также была значительной ($r = -0,67$).

Результаты определения МДА также, как и результаты определения индекса роста люпина, указывают на то, что АИ, использованный без разведения и в разведениях, является не только стимулятором роста люпина узколистного, но и увеличивает его антиоксидантную активность.

Заключение

Анализ ионного состава надосадочной жидкости АИ показал, что в ней содержатся в больших количествах ионы натрия, хлорид-, сульфат- и нитрат-ионы. Активный ил и надосадочная жидкость содержат различные группы прокариотных и эукариотных МО, среди которых максимальная численность приходится на долю микромицетов. Фототрофный комплекс представлен азотфиксирующими ЦБ, зелёными и диатомовыми водорослями.

При изучении сорбционных способностей АИ установлено, что его сухая масса является хорошим сорбентом по отношению к ионам Cu^{2+} и Pb^{2+} . По отношению к Pb^{2+} сорбционная ёмкость АИ была несколько выше по сравнению с Cu^{2+} . Скорость сорбции АИ в разведении 1:100 до 4 раз выше, чем без разведения.

Применение АИ в разведениях 1:10 и 1:100 приводит к стимуляции роста люпина узколистного и в значительной степени увеличивает антиоксидантную активность высшего растения, повышая его иммунные свойства.

Таким образом, прослеживаются перспективы использования АИ при выращивании декоративных культур на почвах, загрязнённых соединениями ТМ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ

УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

1. Demakov V.A., Vasiliev D.M., Maksimova Yu.G., Pavlova Yu.A., Ovechkina G.V., Maksimov A.Yu. Bacteria of activated sludge of biological treatment facilities, transforming cyanopyridines and amides of pyridinecarboxylic acids // *Mikrobiologiya*. 2015. V. 84. No. 3. P. 369–378 (in Russian).
2. Sidorova L.P., Snigireva A.N. Wastewater and industrial water treatment. Part II: Biochemical purification. Active sludge. Equipment. Yekaterinburg, 2017. 127 p. (in Russian).
3. Hentze M., Armoes P., La-Kur-Jansen I., Arvan E. Wastewater treatment. Biological and chemical processes. Moskva: Mir, 2005. 480 p. (in Russian).
4. Shirinkina E.S. Obtaining environmentally friendly building material using wastewater sludge from pulp and paper production // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 4. P. 85–92 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-085-092
5. Shvetsova I.N., Batrakova G.M., Zaitseva T.A. Justification for the use of activated sludge for biological reclamation of soils contaminated with aromatic amines (aniline) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 1. P. 17–21 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-017-021
6. Domracheva L.I. The use of organisms and biosystems in the remediation of territories // *Theoretical and Applied Ecology*. 2009. No. 4. P. 4–16 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-004-016
7. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Kutuyavina T.I. Comparative analysis of the effectiveness of the use of sorbents of different nature with respect to copper(II) ions // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 3. P. 12–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-012-018
8. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Kutuyavina T.I., Simakova V.S., Lyukina A.L. Microorganisms in the bioindication of urban soils // *Biodiagnostics of the state of natural and natural-technological systems: Materials of the 16th All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Kirov: Vyatka State University, 2018. P. 211–215 (in Russian).
9. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Sheshhegova T.K. Assessment of sorption abilities of various species of *Fusarium* micromycetes in relation to heavy metal ions // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 4. P. 102–109 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-103-109
10. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // *Separ. Purif.*

Methods. 2000. V. 29. No. 2. P. 189–232. doi: 10.1018/SPM-100100009

11. Cheung W.H., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetic analysis of the sorption of copper(II) ions on chitosan // J. Chem. Technol. Biotechnol. 2003. V. 78. No. 5. P. 562–571. doi: 10.1002/jctb.836

12. Abdul-Baki A.A., Anderson J.D. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria // Crop Science. 1973. V. 13. P. 630–633. doi: 10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x

13. Lukatkin A.S. Cold damage to heat-loving plants and oxidative stress. Saransk: Izdatelstvo Mordovckogo universiteta, 2002. 208 p. (in Russian)

14. Shang-Lien Lo, Chi-Ying Lin Adsorption of heavy metals from wastewater with waste activated sludge // Journal of the Chinese Institute of Engineers. 1989. V. 12. No. 4. P. 451–461. doi: 10.1080/02533839.1989.9677182

15. Abd-Alla H.M., Yan F., Schubert S. Effects of sewage sludge application on nodulation, nitrogen fixation and plant growth of faba bean, soybean and lupin // J. Appl. Bot. 1999. V. 73. P. 69–75.

16. Apel K., Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction // Ann. Rev. Plant Biol. 2004. V. 55. P. 373–399. doi: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701

17. Antolín M.C., Pascual I., García C., Polo A., Sánchez-Díaz M. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions // Field Crop Res. 2005. V. 94. P. 224–237. doi: 10.1016/j.fcr.2005.01.009

18. Antolín M.C., Muro I., Sánchez-Díaz M. Application of sewage sludge improves growth, photosynthesis and antioxidant activities of nodulated alfalfa plants under drought conditions // Environmental and Experimental Botany. 2010. V. 68. P. 75–82. doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.11.001

19. Antolín M.C., Muro I., Sánchez-Díaz M. Sewage sludge application can induce changes in antioxidant status of nodulated alfalfa plants // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2010. V. 73. P. 436–442. doi: 10.1016/j.ecoenv.2009.08.022

20. Fokina A.I., Domracheva L.I., Ogorodnikova S.Yu. The effect of cyanobacteria *Nostoc paludosum* and its exometabolites on barley growth // Printsipy ekologii. 2019. No. 3. P. 106–116 (in Russian).

21. Fokina A.I., Skugoreva S.G., Domracheva L.I., Kovina A.L. Antagonistic and sorption activity of mono-, binary, and three-species biofilms of soil cyanobacteria // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 119–125. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-119-125