

## Очистка сточных вод и отработанных технологических растворов с повышенным содержанием от ионов металлов и органических соединений с использованием метода сорбции в реакторе

© 2024. В. А. Бродский<sup>1</sup>, к. х. н., доцент, С. В. Джима<sup>1</sup>, аспирант, Хейн Тху Аунг<sup>1</sup>, к. т. н., докторант, А. Е. Лебедев<sup>1</sup>, к. т. н., с. н. с., А. Р. Яворский<sup>1</sup>, инженер, Н. М. Макарова<sup>2</sup>, д. х. н., начальник управления экологического контроля,

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9,

<sup>2</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор»

119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 6, e-mail: vladimir\_brodsky@mail.ru

Сточные воды химических, металлургических, обрабатывающих, обогатительных и, особенно, гальванохимических производств характеризуются повышенным содержанием ионов тяжёлых металлов (ТМ), крайне высоким солевым фоном и содержанием органических загрязнителей. Тяжёлые металлы, сбрасываемые с промышленными сточными водами, становятся угрозой для экосистем из-за их небиоразлагаемости и токсичности. Разработаны различные методы удаления ионов ТМ из промышленных стоков. Сорбционный метод остаётся одним из эффективных методов благодаря простоте эксплуатации, экономичности, широкому спектру доступных адсорбентов и способности удалять как органические, так и неорганические загрязнители. Исследовано влияние концентрации солевого фона на эффективность удаления ионов меди, никеля и цинка из модельных сточных вод методом углеадсорбционной очистки с использованием угля марки БАУ-А. Исследования проводились в присутствии хлорида и сульфата натрия и их смеси в концентрациях до 200 г/л при pH 2,5. Установлено, что максимальная эффективность извлечения ионов Cu(II) – 97% достигается в растворе с концентрацией 50 г/л NaCl. Максимальная эффективность извлечения ионов Ni(II) и Zn(II) (58 и 75% соответственно) обнаружена в растворе, содержащем 50 и 150 г/л смеси NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1:1), после двухчасового процесса сорбции в реакторе. Изучено влияние продолжительности процесса сорбционной обработки в реакторе на эффективность процесса извлечения ионов металлов. Максимальная эффективность процесса отмечена для ионов Cu(II) (98% в растворе, содержащем 100 г/л Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), при продолжительности обработки 3 ч. Эффективность извлечения ионов металлов сорбцией снижается в ряду Cu – Zn – Ni. Концентрация солевого фона и время процесса оказывают существенное влияние на адсорбцию ионов ТМ.

**Ключевые слова:** сорбция, активный уголь, гальваника, тяжёлые металлы, сточные воды.

## Wastewater and waste technological solutions with high salt content treatment from metal ions and organic compounds by the sorption method in the reactor

© 2024. V. A. Brodskiy<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2266-795X, S. W. Jima<sup>1</sup> ORCID: 0009-0008-5394-7122, Hein Thu Aung<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7998-5599, A. E. Lebedev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6765-7563, A. R. Yavorskiy<sup>1</sup> ORCID: 0009-0007-7004-0293, N. M. Makarova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1261-0426

<sup>1</sup>D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, Miusskya Sq., Moscow, Russia, 125047,

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise “Federal Environmental Operator”, 6, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017, e-mail: vladimir\_brodsky@mail.ru

Wastewater from chemical, metallurgical, processing, enrichment and galvanic industries is characterized by increased content of heavy metal ions (HM), extremely high salt organic pollutants content. Heavy metals in industrial wastewater are hazardous for ecosystems due to their non-biodegradability and toxicity. Various methods have been developed to remove HM ions from industrial wastewater. The adsorption method remains one of the effective ones due to its ease of operation, cost-effectiveness, wide range of available adsorbents and ability to remove both organic and

inorganic pollutants. In this paper the background salinity effect on the copper, nickel and zinc ions removal from model wastewater by adsorption process was studied. Activated carbon BAU-A was used to extract HM ions from a model wastewater solution. Sodium chloride and sodium sulfate were used in different concentrations (up to 200 g/L) at pH 2.5. We found that maximum Cu(II) removal efficiency was 97% with 50 g/L NaCl content. The maximum Ni(II) and Zn(II) adsorption (58 and 75% respectively) was in solution with 50 g/L and 150 g/L NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1:1), respectively, after 2-hour sorption process in the reactor. The study examined the effect of time on sorption on the efficiency of the metal ion extraction process. The maximum Cu(II) sorption was after 3 hours of the sorption process and it was 98% in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution (100 g/L). The study showed that the extraction efficiency by sorption decreases in the Cu – Zn – Ni series. The salt content and sorption time has significant effect on adsorption of HM ions.

**Keywords:** adsorption, activated carbon, electroplating, heavy metals, wastewater.

В настоящее время основной задачей промышленной экологии является поиск экономичной и эффективной технологии очистки сточных вод и отработанных технологических растворов. Промывные воды и отработанные технологические растворы обладают токсичностью и опасностью для окружающей среды, что обусловлено, в первую очередь, наличием токсичных ионов тяжёлых металлов (ТМ) в различной концентрации, повышенным солевым фоном и содержанием органических загрязнений. В качестве примера можно привести гальванические, металлургические, кожевенные, текстильные и различные химические производства, которые являются источниками образования сточных вод, содержащих ТМ, масла, жиры, поверхностно-активные вещества и нефтепродукты [1, 2].

Известно множество методов удаления ТМ и органических загрязнений из сточных вод. К таким методам относят сорбцию. Благодаря простоте эксплуатации и широкому спектру применения сорбция считается эффективным методом очистки воды с эффективностью до 99% [3–5]. На данный момент широко применяется процесс сорбционной очистки сточных вод и отработанных технологических растворов от органических загрязнений в сорбционных колоннах, а также путём введения активных углей в реактор [6, 7].

К преимуществам сорбционных методов можно отнести возможность очистки сточных вод, содержащих низкие концентрации загрязняющих веществ, обычно не превышающие 100 мг/л, к недостаткам – наличие стадии регенерации адсорбента регенерирующими растворами и элюатами, а также утилизации самого адсорбента, если регенерация невозможна [4].

Активированный уголь (АУ) является одним из наиболее широко используемых сорбентов благодаря своей высокой эффективности, пористости и большой площади поверхности. Исследования показали, что активированный уголь БАУ-А способен очищать

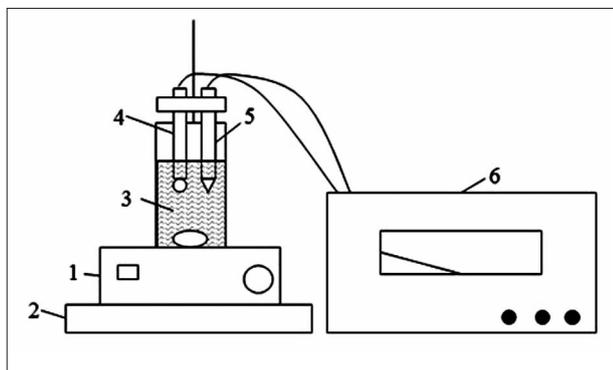
загрязнённые растворы от ионов металлов. Показано, что сорбция ионов металлов на поверхности АУ протекает по механизму простой физической адсорбции, описываемому уравнением Ленгмюра [5, 8].

Целью работы является изучение процессов сорбционной очистки сточных вод и отработанных технологических растворов от токсичных ионов металлов на примере ионов Cu(II), Ni(II) и Zn(II) методом сорбции в реакторе и сорбционных колоннах с использованием древесного активного угля марки БАУ. Новизна работы заключается в изучении влияния природы и концентрации фоновых солей на эффективность протекания процесса сорбции ТМ.

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использованы модельные растворы, содержащие ионы Cu, Ni и Zn, солевой фон (NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), а также ряд органических соединений (машинное масло (I-5A, Shell), моторное масло (Valvoline), бензин (AI 95)). Данный перечень загрязняющих веществ характерен для сточных вод гальванохимических производств и цехов металлообработки.

**Методика приготовления модельных растворов.** Для исследования зависимости сорбционного извлечения ионов металлов от времени в реакторе использовали модельные растворы, содержащие ионы Cu(II), Ni(II) и Zn(II) с суммарной концентрацией 10 мг/л, массовое соотношение металлов – 1:1:1. pH модельного раствора 2,5 – соответствует pH кислых промышленных отходов. В качестве сорбента использован активный уголь марки БАУ-А (ТУ 20.59.54-001-44972796-2020). Основные характеристики: размер зёрен >1,5 мм – не более 25,0%; 0,5–1,5 мм – не менее 70,0%, насыпная плотность составляет не более 240 г/дм<sup>3</sup>, суммарный объём пор по воде составляет не менее 1,6 см<sup>3</sup>/г; массовая доля золы не более 10,0%; адсорбционная активность



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки сорбции в реакторе: 1 – магнитная мешалка, 2 – штатив, 3 – стакан с электролитом, 4 – стеклянный электрод, 5 – хлоридсеребряный электрод, 6 – рН метр / **Fig. 1.** The scheme of the experimental sorption setup in the reactor: 1 – magnetic stirrer, 2 – tripod, 3 – glass with electrolyte, 4 – glass electrode, 5 – silver chloride electrode, 6 – pH meter

не менее 70% (по йоду). Сорбент вводился из расчёта 1 г на 100 мл обрабатываемого раствора. Солевой фон: NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (соотношение 1:1). Диапазон концентраций фоновых солей: 1–200 г/л.

**Методика удаления тяжёлых металлов методом сорбции в реакторе.** В реактор объёмом 500 мл вводили водные растворы, содержащие CuSO<sub>4</sub>, NiSO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub> в объёме 100 мл (рис. 1). Растворы перемешивали магнитной мешалкой BioSanMSH-300 (BIOSAN, Латвия).

В реактор добавляли порошок активированного угля БАУ-А в массовом соотношении 1:100 к модельным растворам. Влияние солей на процесс сорбции ионов ТМ проводили в присутствии NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, а также смеси растворов NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в диапазоне концентраций 1–200 г/л, рН 2,5. Контроль рН осуществляли рН-метром И-160 МИ (ООО «Измерительная техника», Россия). Для определения электропроводности растворов использовали портативный кондуктометр Mettler-Toledo Education Line EL 3 (Mettler-Toledo, Швейцария).

**Методы определения концентрации ионов тяжёлых металлов и органических загрязнений.** Контролируемыми параметрами процесса являются: остаточные концентрации неорганических и органических загрязнений в обрабатываемых растворах. Эффективность процесса очистки оценивается по степени извлечения металлов α (%) и показателю ХПК (мгО/л).

Степень извлечения металлов рассчитывают как отношение разницы между исходной

и конечной концентрациями металлов в растворе (в связанной, ионной и молекулярной формах):

$$\alpha = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{кон}}}{C_{\text{кон}}} \cdot 100\%,$$

где C<sub>исх</sub> и C<sub>кон</sub> – начальная и конечная концентрация ионов металла, мг/л.

Массовую концентрацию металлов определяют с использованием атомно-абсорбционного спектрометра KVANT-2А по стандартизированной методике [7, 9]. Интегральный показатель ХПК определяют по ГОСТ 31859–2012:

$$\text{ХПК} = \frac{(a-b)N \cdot 8 \cdot 1000}{V},$$

где a – объём соли Мора на титрование в холостом опыте, мл; b – объём соли Мора на титрование пробы, мл; N – нормальность титрованного раствора соли Мора; V – объём пробы, мл; 8 – эквивалент кислорода.

**Метод определения сорбционной активности сорбентов.** Сорбционная активность сорбентов Γ, (моль/г) рассчитывалась по формуле:

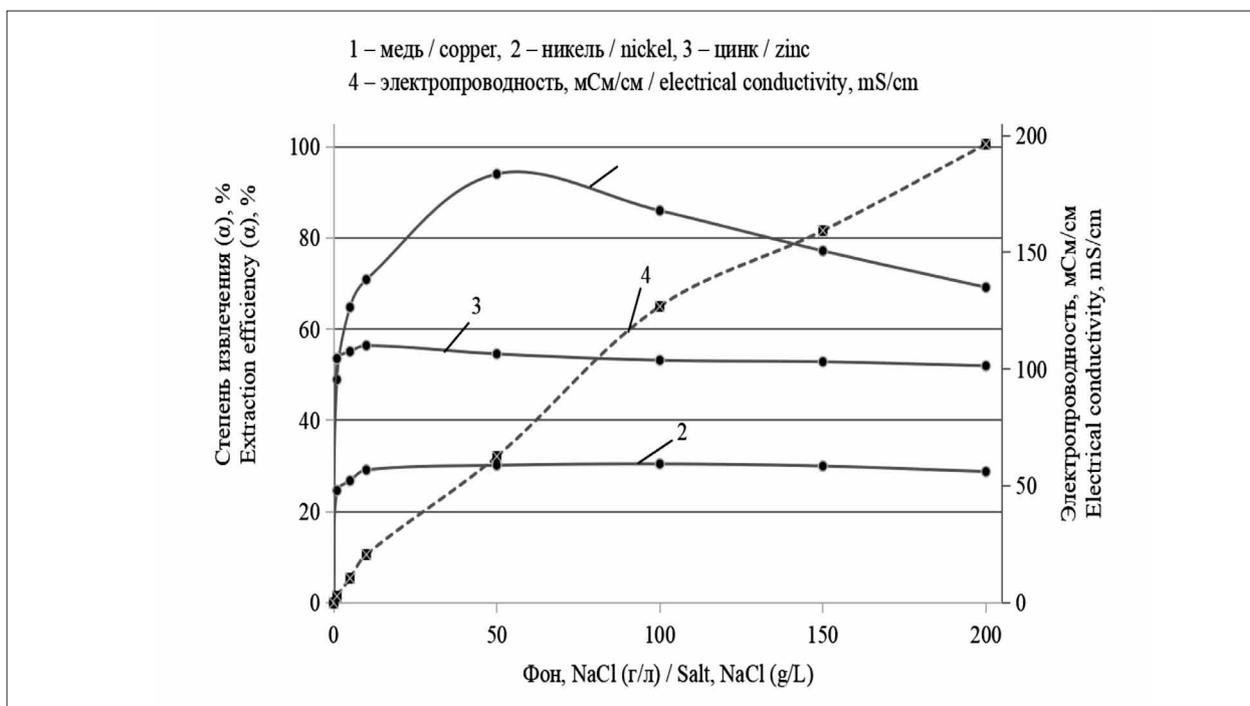
$$\Gamma = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{кон}}) \cdot V_{\text{эл}}}{m},$$

где C<sub>исх</sub> и C<sub>кон</sub> – начальная и конечная концентрация ионов металла, моль/л; V<sub>эл</sub> – объём электролита, л; m – масса сорбента, г.

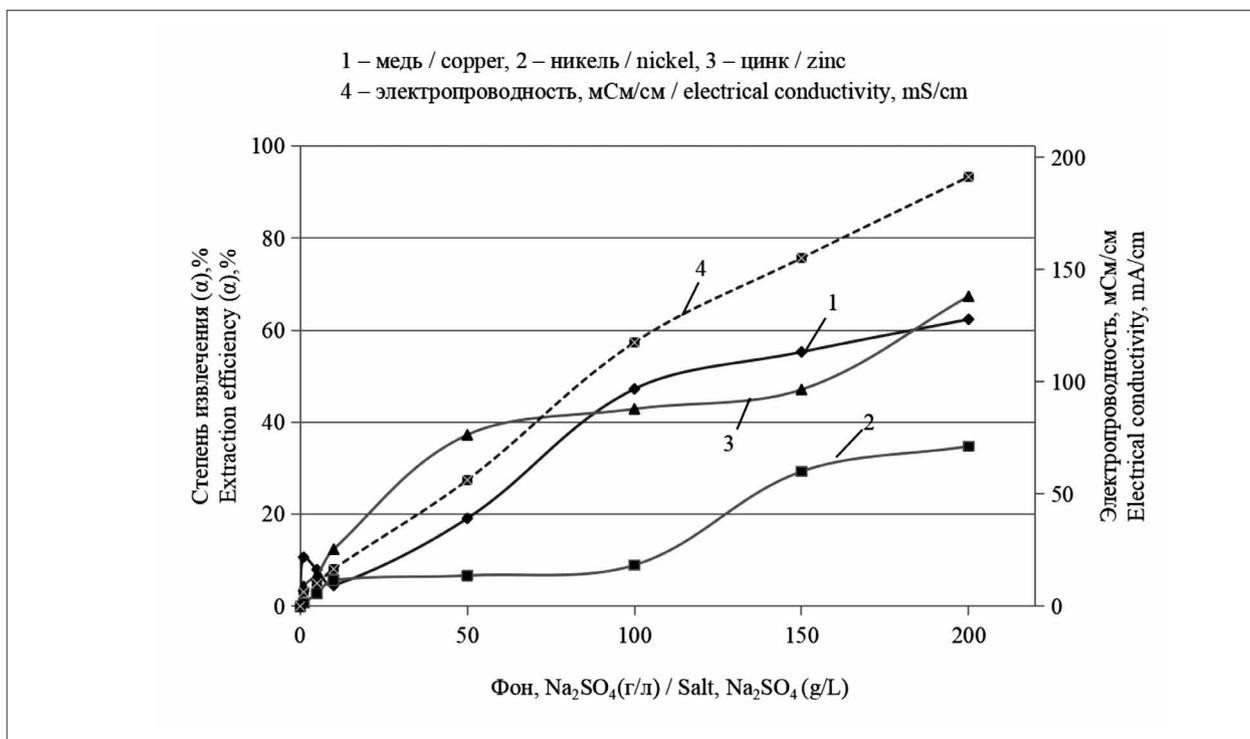
**Обработка экспериментальных данных.** Экспериментальные зависимости получены на основе усреднённых показателей по трём параллельным опытам. Для обработки данных использован метод регрессионного анализа.

## Результаты и обсуждение

**Влияние концентрации и природы электролитов на эффективность очистки растворов, содержащих ионы тяжёлых металлов, методом сорбции в реакторе.** Установлено, что эффективность извлечения ионов Cu(II), Ni(II) и Zn(II) методом сорбции в реакторе зависит от концентрации и природы солей в сточных водах. В присутствии раствора NaCl эффективность сорбции возрастает экспоненциально для всех исследованных ТМ с ростом концентрации солевого фона (рис. 2). Наибольшая эффективность процесса извлечения отмечена для ионов Cu(II) – 97% в растворе с концентрацией 50 г/л NaCl. Повышение концентрации соли приводит к снижению эффективности сорбции ионов меди (77%



**Рис. 2.** Зависимость сорбционного извлечения Cu(II), Ni(II) и Zn(II) от концентрации NaCl в растворе (рН 2,5; время – 2 ч; БАУ-А – 10 г/л)  
**Fig. 2.** Dependence of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) sorption extraction on the NaCl concentration in solution (pH 2.5; time – 2 hours; BAU-A – 10g/L)



**Рис. 3.** Зависимость сорбционного извлечения Cu(II), Ni(II) и Zn(II) от концентрации Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в растворе (рН 2,5; время – 2 ч; БАУ-А – 10 г/л)  
**Fig. 3.** Dependence of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) sorption extraction on the Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentration in solution (pH 2.5; time – 2 hours; BAU-A – 10g/L)

в растворе, содержащем 200 г/л NaCl). Эффективность сорбционного извлечения Ni и Zn относительно низка и не превышает 30 и 56% соответственно.

Исследовано влияние  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  на эффективность извлечения Cu(II), Ni(II) и Zn(II) методом сорбции в реакторе (рис. 3). Установлено, что эффективность извлечения при низких концентрациях  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (менее 10 г/л) крайне низкая. С повышением концентрации солевого фона эффективность сорбционного извлечения возрастает линейно и достигает 62, 34 и 67% для Cu(II), Ni(II) и Zn(II) соответственно в растворах, содержащих 200 г/л  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

На рисунке 4 показана зависимость сорбционного извлечения ионов Cu(II), Ni(II) и Zn(II) от концентрации раствора, содержащего смесь солей NaCl и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Степень извлечения ионов Cu(II), Ni(II) и Zn(II) возрастает с повышением концентрации фоновых солей и достигает максимальных значений (90, 56 и 74% соответственно) при концентрации фона 100 г/л. Этот результат совпадает с исследованием [10, 11] для совместного извлечения Cu и Zn.

Проведённые экспериментальные исследования позволили выявить зависимость эффективности извлечения ионов металлов

методом сорбции в реакторе от природы металла, концентрации и природы солевого фона. Выявлено, что эффективность сорбционного процесса максимальна для ионов меди и снижается в ряду  $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ . Можно отметить, что увеличение концентрации солевого фона, содержащего хлорид-ионы, индивидуально и в смеси с сульфат-ионами до 10 г/л приводит к резкому возрастанию степени извлечения металлов с выходом на плато. Дальнейшее повышение концентрации фона, содержащего хлорид-ионы, до значений, близких к пределам растворимости солей, не приводит к существенному изменению значений степеней извлечения исследуемых металлов.

Можно предположить, что скорость сорбции ионов в реакторе возрастает в ряду  $\text{Ni}^{2+} < \text{Zn}^{2+} < \text{Cu}^{2+}$ , что соотносится с данными, полученными для сорбции в колоннах [11, 12].

Исследована сорбционная активность сорбента Г, (моль/г) по отношению к ионам Cu(II), Ni(II) и Zn(II) в растворах фоновых солей (5–200 г/л). Полученные данные представлены на рисунке 5. Можно сделать вывод, что сорбционное извлечение металлов методом сорбции в реакторе зависит от концентрации солей в растворе. На данную способность влияет молекулярная сила соли в растворе сточных вод.

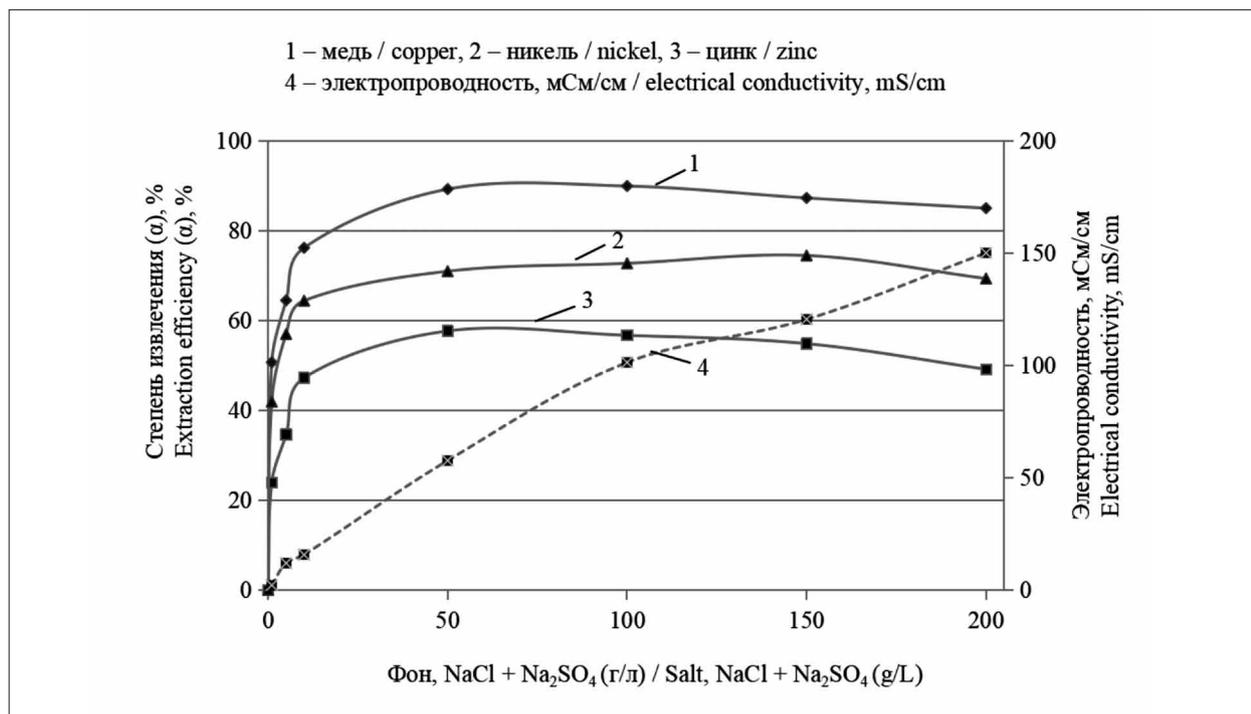
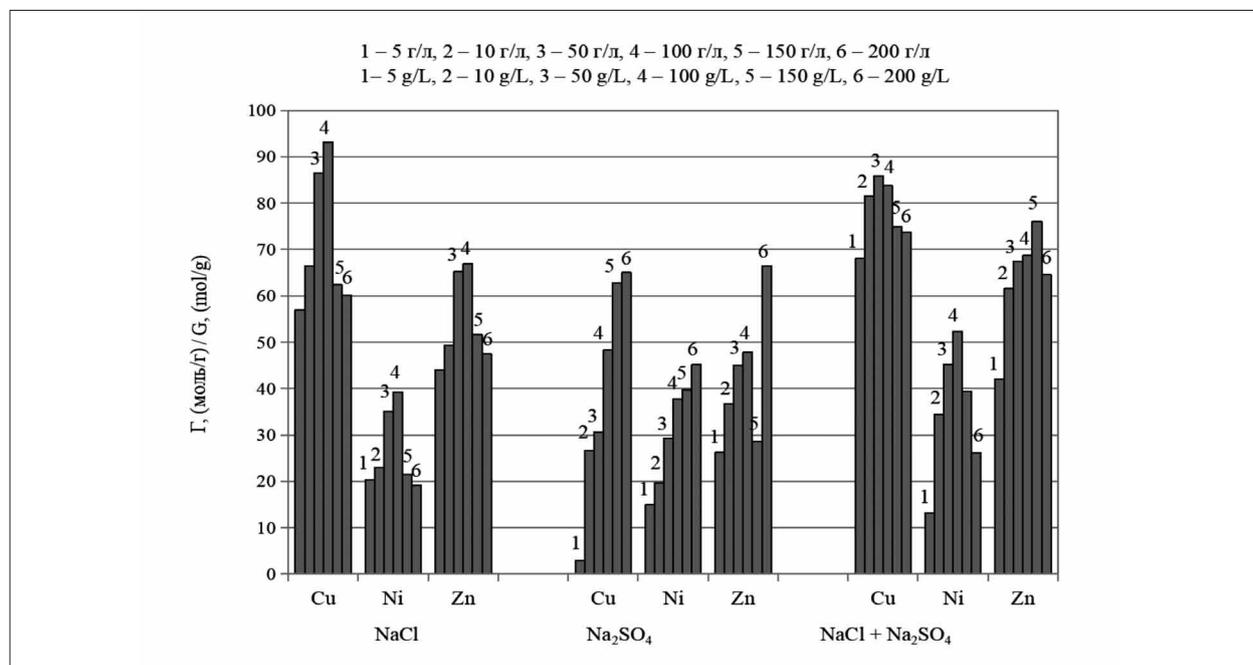


Рис. 4. Зависимость сорбционного извлечения Cu(II), Ni(II) и Zn(II) от концентрации NaCl и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в растворе (pH 2,5; время – 2 ч; БАУ-А – 10 г/л)  
Fig. 4. Dependence of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) sorption recovery on the NaCl and  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  concentration in solution (pH 2.5; time – 2 hours; BAU-A – 10 g/L)



**Рис. 5.** Зависимость сорбции ионов металлов,  $G$  (моль/г), от природы электролита (рН 2,5; время – 2 ч; БАУ-А – 10 г/л)  
**Fig. 5.** Dependence of metal ions sorption,  $G$  (mol/g), on the electrolyte nature (pH 2.5; time – 2 hours; BAU-A – 10 g/L)

На основании экспериментальных данных, представленных на рисунке 5, можно сделать следующий вывод: сорбционная активность  $G$  (моль/г) металла зависит от концентрации, а также от типа раствора электролита. Более высокая сорбционная активность обнаружена в растворе электролитов NaCl и смеси NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в интервале концентраций 50–150 г/л. В растворе Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> сорбционная активность металлов возрастает с ростом концентрации соли. Сорбционная ёмкость во всех растворах электролитов снижалась в ряду ионов: медь – цинк – никель. При этом остаточная концентрация группы Cu<sup>2+</sup> составляет 0,032 мг/л в растворе NaCl, 0,45 мг/л – в растворе Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 0,12 мг/л – в растворе NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Проведено исследование изменения электропроводности  $\chi$  (мСм/см) исследуемых растворов в процессе их обработки методом сорбции в реакторе. С повышением концентрации солей от 5 до 200 г/л,  $\chi$  растворов возрастает с 3,96 до 201,7 мСм/см для NaCl, с 2,13 до 160,1 мСм/см и с 5,92 до 103,5 мСм/см – для Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и с 2,06 до 150,3 мСм/см – для смеси NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Следует отметить, что через 2 ч после начала процесса сорбции электропроводность для растворов солей с концентрацией 100 г/л снижается для NaCl с 133,1 до 127,8 мСм/см, для Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – с 117,3 до 13,7 мСм/см и для

смеси солей NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – с 102,1 до 98,3 мСм/см. Это свидетельствует об участии солевого фона в процессе сорбции [13].

**Комплексный подход к переработке жидких отходов, содержащих органические и неорганические компоненты.** Помимо гальванических, металлургических и машиностроительных производств, характеризующихся повышенным содержанием ионов металлов, ПАВ и органических соединений в сточных водах, пищевые, кожевенные и целлюлозно-бумажные производства также являются источником загрязнения водных объектов органическими загрязнителями [13, 14]. В состав органических загрязнителей могут входить белки, органические растворители, углеводы, жиры, нуклеиновые кислоты, красители, а также ароматические галогениды или нитроароматические вещества, стойкие органические загрязнители (СОЗ), которые представляют собой химические соединения и смеси на основе углерода, например полихлорированные дифенилы (ПХД), пестициды, фармацевтически активные соединения (ФАКС), триметоприм (ТМП), пентахлорфенол (ПХФ) и прочие отходы [15–17]. Показано, что углеадсорбционная очистка эффективна для извлечения из сточных вод красителей и органических веществ [18–20].

На основе полученных экспериментальных и литературных данных предложена принци-

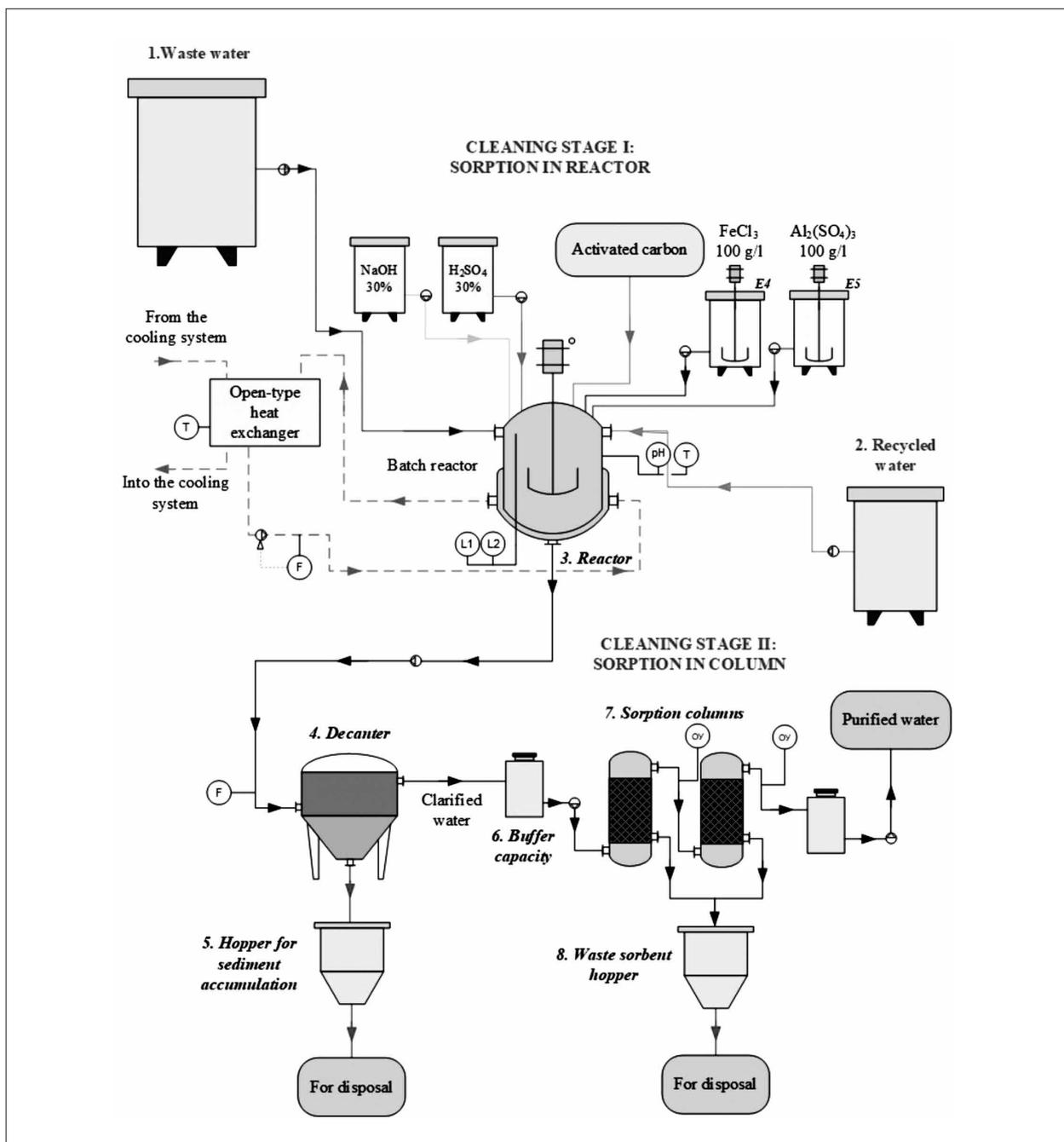


Рис. 6. Принципиальная схема переработки жидких отходов, содержащих органические и неорганические компоненты  
 Fig. 6. Schematic diagram for processing liquid waste containing organic and inorganic components

пиальная схема переработки жидких отходов, содержащих органические и неорганические компоненты, методом сорбции (рис. 6).

Основные стадии переработки отходов, содержащих органические компоненты и ионы ТМ:

- нейтрализация среды путём введения концентрированного раствора гидроксида натрия (или серной кислоты, при необходимости);

- коагуляция органических компонентов с целью осаждения осадка органических соединений. Возможно добавление АУ в виде порошка для улучшения эффективности выделения органических соединений;

- отделение осадка органических соединений в декантере (центробежный сепаратор);

- сорбционная очистка с применением напорных фильтров с загрузкой из АУ.

Эффективность извлечения ионов металлов и органических эмульсий из водных растворов  
Efficiency of metal ions and organic emulsions extraction from aqueous solutions

Загрязнитель Pollutant	рН	Стадия очистки / Cleaning stage			α, %
		Стадия 1 <sup>1</sup> Stage 1	Стадия 2 <sup>2</sup> Stage 2	Стадия 1, 2 <sup>3</sup> Stage 1, 2	
$C_{\Sigma Me} = 50-100$ мг/л / mg/L		Остаточная концентрация $C_{ост}$ , мг/л Residual concentration of $C_{res}$ , mg/L			
$Cu^{2+}$	9–9,5	0,5–1	0,1–1	<0,1	>99
$Ni^{2+}$	10,5–11	1–2	0,05–0,5	<0,1	>99
$Zn^{2+}$	9–9,5	0,5–1,5	0,1–1	<0,1	>99
Органика, ХПК 100–1000 мг/л Organic, COD 100-1000 mg/L		ХПК, мгО/л COD, mgO/L			
Машинное масло Engine oil (I-5A, Shell)	6,5–7,0	20–120	20–75	<10	>99
Машинное масло Engine oil (Valvoline)	6,0–8,0	10–100	5–55	<10	>99
Бензин / Gasoline (AI 95)	6,5–7,0	15–115	15–65	<10	>99
ПАВ / Surfactants (NaDDS)	6,0–10,0	55–600	40–400	<10	>99

Примечание / Note: <sup>1</sup> сорбция в реакторе / sorption in the reactor; <sup>2</sup> сорбция в колонне / sorption in the column; <sup>3</sup> совместно / together.

Стадия нейтрализации реализована путём добавления раствора гидроксида натрия с массовой долей 30 масс. %. В стадии коагуляции использовались растворы хлорида железа и сульфата алюминия, а также АУ.

В таблице представлены данные, характеризующие эффективность совместного процесса очистки воды от ионов ТМ в присутствии АУ, а также очистки воды от эмульсий промышленных масел, бензина, ПАВ в присутствии коагулянта  $Al_2(SO_4)_3$  в составе многокомпонентной смеси, полученные для промышленных стоков действующих предприятий.

Показано, что использование АУ на стадии коагуляции увеличивает эффективность процесса очистки. Из данных таблицы 1 следует, что остаточная концентрация ионов  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  при фильтрации в колонне/реакторе совместно с адсорбцией составляет менее 0,1 мг/л. Для органических соединений было определено ХПК после стадий фильтрации в колонне/реакторе совместно с адсорбцией и без неё. Выявлено, что при фильтрации в колонне/реакторе совместно с адсорбцией процесс очистки идёт лучше, ХПК составляет менее 10 мгО/л. Это говорит об эффективности предложенной схемы очистки.

### Заключение

Показано, что углеадсорбционная обработка сточных вод в реакторе позволяет

извлекать из водных растворов ионы ТМ без предварительной коррекции рН, что актуально с точки зрения сокращения затрат на реагентную обработку.

Эффективность обработки зависит от природы фоновых электролитов и металлов. Вне зависимости от природы солевого фона эффективность извлечения металлов уменьшается в ряду  $Cu - Zn - Ni$ . Более высокая степень извлечения ТМ отмечена в присутствии  $NaCl$ : так, остаточная концентрация  $Cu^{2+}$  в растворе  $NaCl$  составила 0,032 мг/л, в растворе  $Na_2SO_4$  и смеси  $NaCl + Na_2SO_4 - 0,45$  и 0,12 мг/л соответственно.

Показано, что технология углеадсорбционной очистки в реакторе с последующей доочисткой в колоннах с загрузкой активированного угля эффективна для сточных вод, загрязнённых органическими соединениями и ионами тяжёлых металлов и позволяет производить очистку до нормативов ПДК для рыбохозяйственных водоёмов.

### References

1. Belova L.V., Vyalkova E.I., Glushchenko E.S., Osipova E.Yu. Electroplating plant sewage technology // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2021. V. 23. No. 3. P. 143–154 (in Russian). doi: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-143-154
2. Kolesnikov A.V., Kisilenko P.N., Grafov D.Yu., Il'in V.I. Analysis of the efficiency of electrochemical, membrane and adsorption methods for wastewater treatment technology

by heavy metal ions and organic impurities // *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2014. V. 22. No. 3. P. 45–53 (in Russian).

3. Merchant R.R., Painter Z.Z. Study of removal of heavy metals from waste water by adsorption // *Int. J. Appl. Eng.* 2019. V. 14. No. 1. P. 63–68.

4. Petukhova Yu.N., Il'ina S.I., Fursenko A.V., Nosyrev M.A. Purification of wastewater from heavy metal ions using sorbents // *Yevraziyskiy Soyuz Uchenykh*. 2019. V. 7. No. 64. P. 51–54 (in Russian). doi: 10.31618/ESU.2413-9335-2019-6-64-254

5. Panfilova O.N. Treatment of urban waste water from ions of heavy metals by using new sorption material // *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2020. V. 10. No. 2. P. 22–28 (in Russian). doi: 10.17673/Vestnik-2020-02-4

6. Shilina A.S., Milinchuk V.K. Sorption clearing of natural and industrial waters from cations of heavy metals and radionuclides with new type of high-temperature aluminosilicate adsorbent // *Sorption and chromatographic processes*. 2010. V. 10. No. 2. P. 237–245 (in Russian).

7. Sukharev Yu.I., Lebedeva I.Yu., Apalikova I.Yu., Vertsyukh E.S. Sorption treatment and recycling of wastewater from coke production // *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodostabzheniye*. 2011. V. 38. No. 2. P. 38–54 (in Russian).

8. Linnikov O.D., Rodina I.V., Baklanova I.V., Suntsov A.Yu. Sorption of ions Cu(II) by activated carbon BAU-A // *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2018. V. 18. No. 4. P. 554–562 (in Russian). doi: 10.17308/sorpchrom.2018.18/563

9. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Kut'yavina 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

10. Dizadji N., Dehpouri S., Vossoughi S. Experimental investigation of adsorption of heavy metals (Copper(II)) from industrial wastewater with Clinoptilolite // *Chemical Engineering Transactions*. 2012. V. 29. P. 1309–1314. doi: 10.3303/CET1229219

11. Karnib M., Kabbani A., Holail A., Olama Z. Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite // *Energy Procedia*. 2014. V. 50. P. 113–120. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.014

12. Babel S., Kurniawan T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review // *J. Hazard. Mater.* 2003. V. 97. No. 1–3. P. 219–243. doi: 10.1016/S0304-3894(02)00263-7

13. Kavand M., Kaghazchi T., Soleimani M. Optimization of parameters for competitive adsorption of heavy metal ions (Pb<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>) onto activated carbon // *Korean J. Chem. Eng.* 2014. V. 31. No. 4. P. 692–700. doi: 10.1007/s11814-013-0280-8

14. Renu, Agarwal M., Singh K. Heavy metal removal from wastewater using various adsorbents: a review // *J. Water Reuse Desalin.* 2017. V. 7. No. 4. P. 387–419. doi: 10.2166/wrd.2016.104

15. Fokina A.I., Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Gornostaeva E.A., Ogorodnikova S.Yu. Heavy metals as a factor of microorganisms metabolism changes (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 2. P. 5–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-2-005-018

16. Bhavani K., Roshan Ara Begum E., Selvakumar S., Shenbagarathai R. Chitosan – a low cost adsorbent for electroplating waste water treatment // *J. Bioremed. Biodeg.* 2016. V. 7. No. 3. Article No. 346. doi: 10.4172/2155-6199-1000346

17. Savichev O.G., Bazanov V.A., Lomakina N.Yu. Analysis of the efficiency of municipal wastewater treatment in the Tomsk region // *Vestnik nauki Sibiri*. 2012. No. 1 (2). P. 17–24 (in Russian).

18. Sionikhina A.N., Nikiforova T.E. Sorption of heavy metal ions from water solutions cellulose sorbents modified polyvinylpyrrolidone // *Fundamental Research*. 2011. No. 12-4. P. 773–776 (in Russian).

19. Ali I., Asim M., Khan T.A. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater // *J. Environ. Manage.* 2012. V. 113. P. 170–183. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.028

20. Soldatkina L.M., Sagaidak E.V. Kinetics of adsorption of water-soluble dyes on active carbons // *J. Water Chem. Technol.* 2010. V. 32. No. 4. P. 212–217 (in Russian). doi: 10.3103/S1063455X10040041