

PACS numbers: 81.07.-b, 89.30.aj, 89.60.-k, 91.62.Jf, 92.20.jb, 92.40.kc, 92.40.qc

## **Композитная система на основе смеси нанокремнезёмов и бактерий для очистки воды от моторного масла**

Н. Ю. Клименко, И. В. Сиора, Е. А. Новикова, Т. В. Крупская,  
В. В. Туров

*Институт химии поверхности им. А. А. Чуйко НАН Украины,  
ул. Генерала Наумова, 17,  
03164 Киев, Украина*

Целью работы было создание композитной системы для деструкции углеводородов моторного масла на основе смеси гидрофильного (А-300) и гидрофобного (АМ1-300) кремнезёмов и нескольких видов бактерий рода *Bacillus*, входящих в состав биопрепарата «Доктор Робик 106». Установлено, что минеральная составляющая композита активно способствует жизнедеятельности микроорганизмов, вероятно, за счёт повышения проницаемости клеточных мембран для питательных веществ и продуктов клеточного метаболизма. При этом адсорбция моторного масла на минеральном композите пропорциональна его количеству, а присутствие бактерий в составе композитной системы уменьшает его адсорбционную способность. По сравнению с чистой культурой биопрепарата утилизация моторного масла биоконкомпозитом осуществляется значительно эффективнее. То есть разработанная система может быть рекомендована для практического применения.

Метою роботи було створення композитної системи для деструкції вуглеводнів моторної оливи на основі суміші гідрофільного (А-300) та гідрофобного (АМ1-300) кремнеземів і декількох видів бактерій роду *Bacillus*, що входять до складу біопрепарату «Доктор Робік 106». Встановлено, що мінеральна складова композиту активно сприяє життєдіяльності мікроорганізмів, ймовірно, за рахунок підвищення проникності клітинних мембран для поживних речовин і продуктів клітинного метаболізму. При цьому адсорбція моторної оливи на мінеральному композиті пропорційна його кількості, а присутність бактерій у складі композитної системи зменшує його адсорбційну здатність. Порівняно з чистою культурою біопрепарату утилізація моторної оливи біоконкомпозитом здійснюється значно ефективніше. Тобто розроблена система може бути рекомендована для практичного застосування.

The purpose of the work is to create a composite system based on the mix-

ture of hydrophilic (A-300) and hydrophobic (AM1-300) silica, and *Bacillus* bacteria of several species as the components of the biopreparation 'Doctor Robic 106'. As determined, the mineral component of the composite system significantly intensifies the vital activity of microorganisms, probably, due to the higher penetration of cellular membranes for nutritive substances and cell metabolites. In such a case, adsorption of motor oil by the mineral composite is proportional to its quantity, and the presence of bacteria in the composite system reduces its adsorption capacity. As compared with the pure culture of the biopreparation, the process of purifying water from motor oil by the composite system is far more efficient. Due to this, the developed composite system may be recommended for practical use.

**Ключевые слова:** очистка воды, гидрофильный и гидрофобный кремнезёмы, композитная система, бактерии рода *Bacillus*, деструкция углеводородов, моторное масло.

**Ключові слова:** очистка води, гідрофільний і гідрофобний кремнезему, композитна система, бактерії роду *Bacillus*, деструкція вуглеводнів, моторне масло.

**Key words:** water purification, hydrophilic and hydrophobic silicas, composite system, bacteria of the *Bacillus* genus, destruction of hydrocarbons, motor oil.

(Получено 22 октября 2019 г.)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной проблемой многих стран мира является загрязнение окружающей среды токсичными, канцерогенными и мутагенными веществами антропогенного происхождения [1, 2]. Среди них одно из первых мест принадлежит нефти и нефтепродуктам (бензин, дизельное топливо, масла, смазки, мазут), способных образовывать токсичные соединения в воде и почве, которые затем могут попадать в человеческий организм, накапливаясь в рыбе и моллюсках или путём потребления загрязнённых подземных вод [3–5]. Известно [6], что в состав нефти входит около 57% алифатических и около 29% ароматических углеводородов, а также 14% других органических соединений, таких как смолы, меркаптаны, нафтеновые кислоты, асфальтены. При попадании в водную среду нефть и нефтепродукты быстро разделяются на агрегатные фракции в виде плёнок, растворённых и взвешенных форм, эмульсий, при этом доминирующей миграционной формой обычно является эмульгированная и растворённая нефть [3]. Отработанное моторное масло содержит металлы и тяжёлые полициклические ароматические уг-

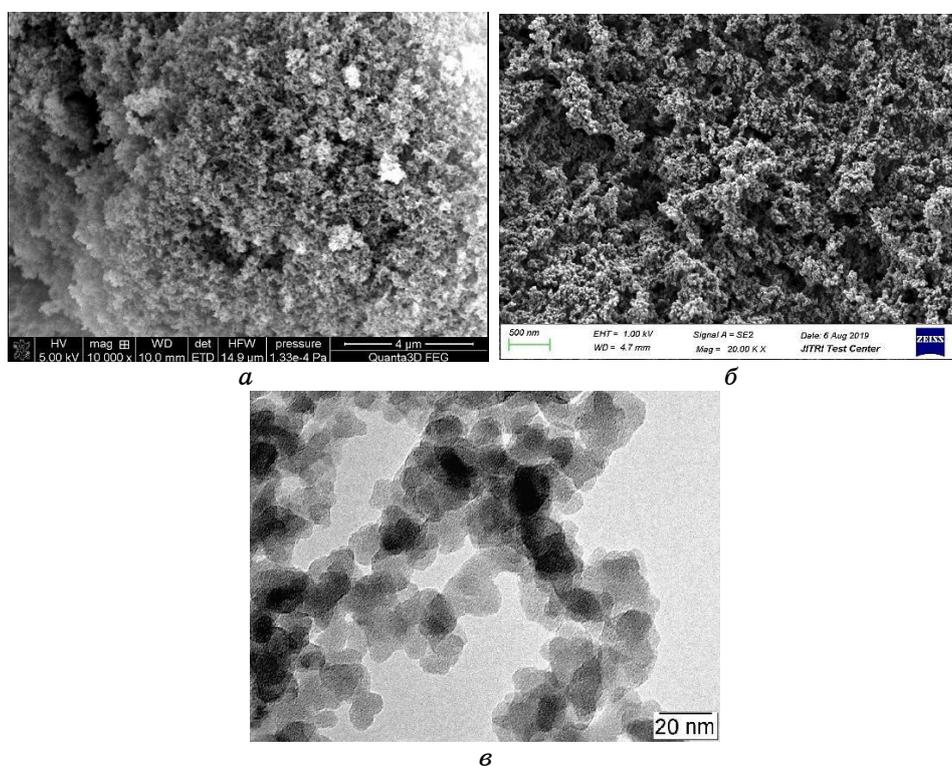
леводороды, изоалканы, парафиновые, олефиновые, и ароматические соединения, а также соединения серы, азота, металлов и некоторых других веществ, которые могут способствовать возникновению ряда хронических заболеваний [5, 7, 8]. В экосистемах углеводороды трудно разлагаются и чрезвычайно устойчивы к таким факторам как температура, солнечная радиация, влажность и т.д. [3, 9].

Существует большое количество методов очистки воды от углеводородов: термический, механический, химический, микробиологический, физико-химический, биосорбционный, флотационно-кавитационный метод, очистка воды с помощью магнитов и магнитных наночастиц, озонирование воды, а также применение различных типов фильтрующих устройств [10]. Однако наиболее дешёвым, безопасным и перспективным является биоремедиация — процесс, направленный на возвращение загрязнённой окружающей среды в её естественное состояние, с использованием микроорганизмов, грибов, растений или их ферментов [9]. Основными критериями для подбора эффективных микроорганизмов является их непатогенность для человека и животных, высокая жизнеспособность, ферментативная активность, способность к окислению значительного количества углеводородов и устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды (колебания температуры, влажность, изменение pH среды, недостаточная концентрация биогенных элементов, доступность кислорода, засоленность и т.д.) [11, 12].

Так как микробиологическая очистка загрязнённых природных водоёмов происходит при свободном доступе кислорода, наиболее эффективными являются аэробные или факультативно-аэробные бактерии. Типичными микроорганизмами-нефтедеструкторами являются бактерии родов *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Acinetobacter* и др. [11, 13, 14]. Для повышения способности к биодеструкции клеток целесообразно иммобилизовать на сорбенте с целью удержания их в районе локального загрязнения, сохранение оптимальной концентрации, защиты от неблагоприятных факторов окружающей среды, что, в отличие от свободной культуры, увеличивает время активного использования клеток и позволяет сократить сроки восстановления природной среды с десятков лет до нескольких месяцев [15, 16]. Сорбенты для очистки воды от нефтепродуктов классифицируют на природные (торф, глина, уголь, песок, а также растительные остатки — опилки, солома, хлопок и др.), искусственные (вискоза, цеолиты, силикаты и т.д.) и синтетические волокна, пенополиуретан и др. [15, 17, 18]. По сравнению с указанными носителями нанокремнезём имеет ряд преимуществ [19, 20]. Ранее нами было смоделировано действие композитной системы на основе кремнезёмов и дрожжевых клеток,

что показало положительный результат в модельной системе при биодеструкции моторного масла [20].

На сегодняшний день существует дефицит биопрепаратов с микроорганизмами, иммобилизованными на минеральных сорбентах, используемых для очистки воды от нефтепродуктов в водной среде. Поэтому целью работы было создание биокомпозитной системы для деструкции углеводородов моторного масла на основе смеси гидрофильного (А-300) и гидрофобного (АМ1-300) кремнезёмов и нескольких видов бактерий рода *Bacillus*, которые являются одними из распространённых в природе и известны как активные деструкторы углеводородов нефтепродуктов в окружающей среде в широком диапазоне температур (от 4 до 28°C), а также входят в состав биотехнологических препаратов [21, 22].



**Рис. 1.** СЕМ-микрофотографии гидрофильного (а) и гидрофобного (б) кремнезёмов; ТЭМ-микрофотографии смеси кремнезёмов (А-300/АМ1-300 при соотношении 50/50) (в).<sup>1</sup>

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

В работе использовали гидрофильный (А-300) и гидрофобный (АМ1-300) кремнезёмы (удельная поверхность  $S_{\text{БЭТ}} \approx 275 \text{ м}^2/\text{г}$ ), произведённые Калушским опытно-экспериментальным заводом Института химии поверхности им. А. А. Чуйко НАН Украины (рис. 1); биопрепарат «Доктор Робик 106» (ООО «Робик Плюс», Украина), который содержит смесь нескольких видов бактерий рода *Bacillus*: *Bac. subtilis*, *Bac. macerans*, *Bac. amyloliquefaciens*, *Bac. pumilis*, *Bac. licheniformis*, *Bac. brevis*; моторное масло для двигателей ('Ремсо kuras', Литва).

Наноккомпозит создавали путём тщательного растирания смеси кремнезёмов и бактерий, которые при отсутствии благоприятной среды находятся в неактивном состоянии (см. табл.; образцы 1–3). Механическое растирание не повреждает спор *Bacillus*, поскольку они покрыты прочной оболочкой, устойчивой к внешним экстремальных факторам. Для приготовления исходной смеси кремнезёмов использовали соотношение А-300/АМ1-300 1/1, а для композитной системы — смесь кремнезёмов к клеткам — соотношения 1/0,5, 1/1 и 1/2. Для моделирования естественного процесса деградации углеводов в водной среде в стакан ёмкостью 250 мл добавляли воду (100 мл), моторное масло (3 мл) и композиты массой 2 г. Процесс разрушения моторного масла композитными системами оценивали относительно образцов, которые содержали углеводороды без кремнезёмов, только в присутствии бактерий (см. табл.; образцы 1К–3К) и контрольная система только с кремнезёмом без присутствия бактерий (см. табл.; образцы 1КР–3КР). Исследуемые системы инкубировали в статических условиях в термостате при 35°C, что соответствует оптимальной температуре развития суспензии клеток рода *Bacillus*.

Поскольку растворимость нефтепродуктов в воде незначитель-

ТАБЛИЦА. Количественный состав образцов.<sup>2</sup>

Образец	$m$ (смеси нанокремнезёмов), г	$m$ (биопрепарата), г
1	1,0	1,0
2	0,6	1,4
3	1,3	0,7
1К	—	1,0
2К	—	1,4
3К	—	0,7
1КР	1,0	—
2КР	0,6	—
3КР	1,3	—

на, то их накопление происходит в первую очередь на поверхности и на дне водной среды. Содержание ПАВ в нефти способствует образованию стабильных нефтеводных эмульсий и тонкой плёнки на поверхности, препятствующей воздухообмену. Известно, что при толщине плёнки нефтепродуктов более 0,1 мм замедляются процессы проникновения атмосферного кислорода в воду и удаления углекислоты из воды [6]. Поэтому при проведении эксперимента для свободного газообмена использовали полипропиленовые трубки, что способствовало поступлению кислорода, который находился в составе воздуха, в воду для обеспечения жизнедеятельности аэробных бактерий *Bacillus*, а, следовательно, и ускорения биодеструкции.

Изменение оптической плотности бактериальной биомассы определяли спектроскопически с помощью фотоколориметра КФК-2МП при длине волны 540 нм и длине оптического пути 0,5 см [23]. Образцы суспензии отбирали при помощи пипетки Пастера через закреплённые на стаканах полипропиленовые трубочки. Измерение оптической плотности проводили ежедневно в течение 146 суток (5 месяцев) до исчезновения масляного пятна на поверхности воды. Периодически проводили микрофотосъёмки суспензий с помощью микроскопа Primo Star (Zeiss, Германия) в режиме пропускания.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Bacillus* принадлежит к роду аэробных грамположительных бактерий палочковидной формы, образующих споры в экстремальных условиях (рис. 2, а) [9, 24] и не повреждающихся при приготовлении композитной системы с кремнезёмами (рис. 2, б).

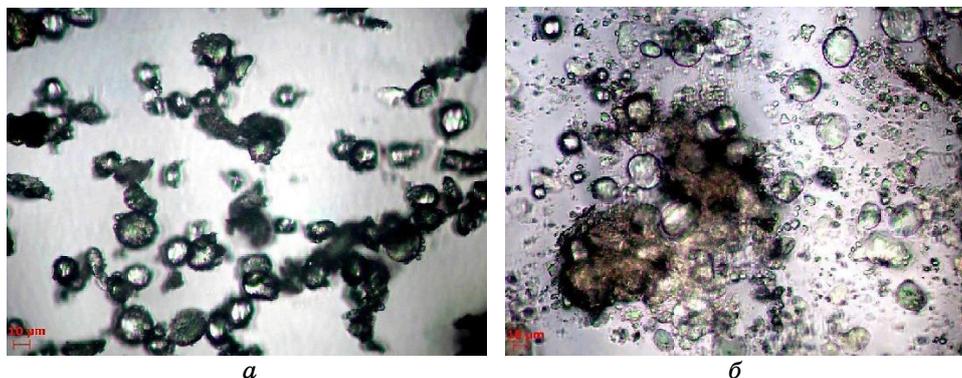
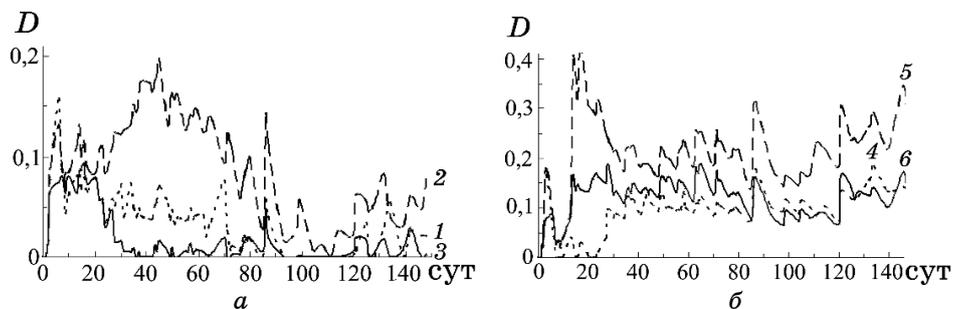


Рис. 2. Микрофотографии биопрепарата (а) и композитной системы (б) на его основе (увеличение  $\times 40$ , пропускание).<sup>3</sup>

При добавлении смеси клеток в составе образцов без кремнезёмов (образцы 1К–3К) в водную среду с моторным маслом бактерии попадали в благоприятные условия, начинали прорастать и превращались в вегетативные клетки на вторые сутки эксперимента, что визуально проявлялось в помутнении контрольных растворов и наличии пика при измерении оптической плотности (первый пик на зависимости  $D(t)$  на рис. 3, а). В образцах с композитными системами наблюдали пик развития бактерий на 3 сутки, что сопровождалось появлением пены на поверхности, и наличием первого максимум оптической плотности, который соответствует росту биомассы бактерий, способствующих деструкции углеводов моторного масла, находящихся в воде (см. рис. 3, б, кривые 4–6). Приведённый результат согласуется с данными, полученными другими исследователями, в соответствии с которыми бактерии рода *Bacillus* эффективно разлагают нефтяные углеводороды и тяжёлые металлы из загрязнённых почв [25, 26].

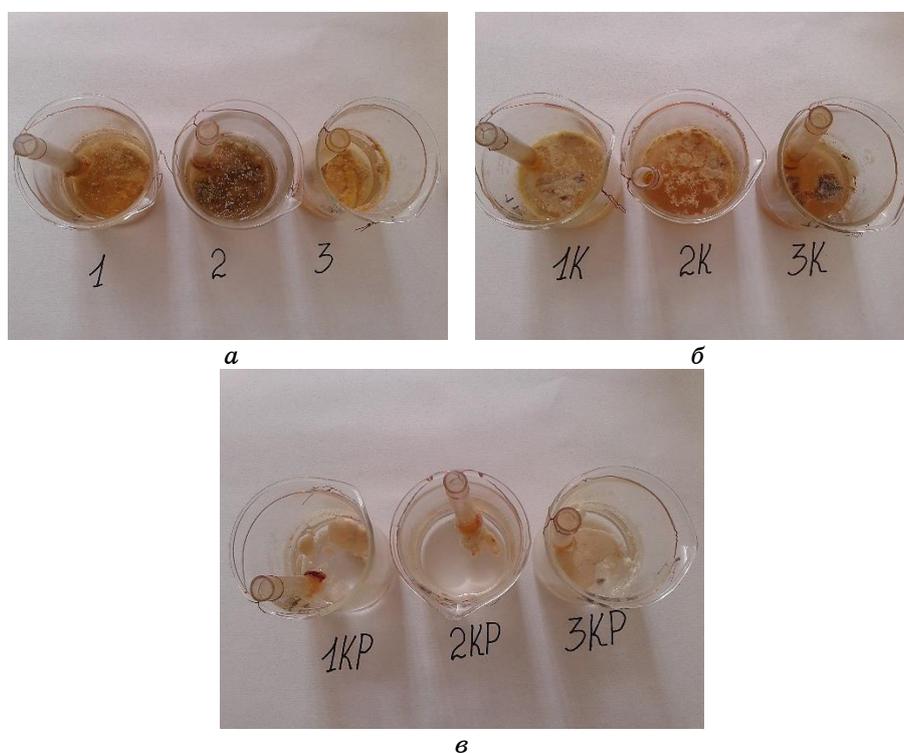
Исследуемые образцы 1–3 представляют собой смесь конгломератов спор бактерий *Bacillus* (см. рис. 3, а), которые за счёт электростатического взаимодействия удерживают непосредственно на себе частицы смеси кремнезёмов. При внесении в водную среду с моторным маслом споры начинали прорастать только тогда, когда композит в образцах 1 и 2 был смоченный водно-масляной эмульсией на 80–90%. Появление резкого характерного запаха и увеличение прироста биомассы указывает на переход в стадию усиленного размножения клеток (экспоненциальная фаза) (левое крыло первого пика на рис. 3, а, кривые 1–2). Значение максимумов оптической плотности для указанных образцов почти в два раза больше, по сравнению с композитной системой 3. После экспоненциальной фазы наблюдается фаза замедленного и стационарного роста с одинаковым количеством клеток, кото-



**Рис. 3.** Зависимость оптической плотности суспензии бактериальных клеток рода *Bacillus* в присутствии моторного масла от времени культивирования и их количества в композите: 1–3 — образцы 1–3 (а), 4–6 — образцы 1К–3К (б).<sup>4</sup>

рые размножаются, растут и отмирают. На 9 сутки наблюдается минимум оптической плотности экспериментальных образцов 1–3, что свидетельствует о переходе в фазу отмирания бактерий, в течение которого бактерии прекращают физиологические процессы деления и образуют ферменты, что превращают первичные продукты обмена веществ во вторичные — процесс вторичного метаболизма. Для этой фазы характерно образование групп многих видов микроорганизмов, связанных между собой метаболическими связями, что сопровождается появлением ряда следующих максимумов оптической плотности на рис. 3. Под слоем аэробных бактерий *Vacillus* развивается слой анаэробных.

Начиная с 14 суток, на поверхности образцов 1 и 2 наблюдается развитие других типов микробных клеток и грибов, живущих за счёт метаболических веществ *Vacillus*. Этот период совпадает со вторым максимумом оптической плотности, который для образца 2 в 1,5 раза выше, чем для образца 1. Следует отметить,



**Рис. 4.** Фотографии деструкции моторного масла на 146 сутки эксперимента образцами: смесь кремнезёмов и бактерий (образцы 1–3), без кремнезёмов в присутствии бактерий (образцы 1К–3К), без бактерий с кремнезёмом (образцы 1КР–3КР).<sup>5</sup>

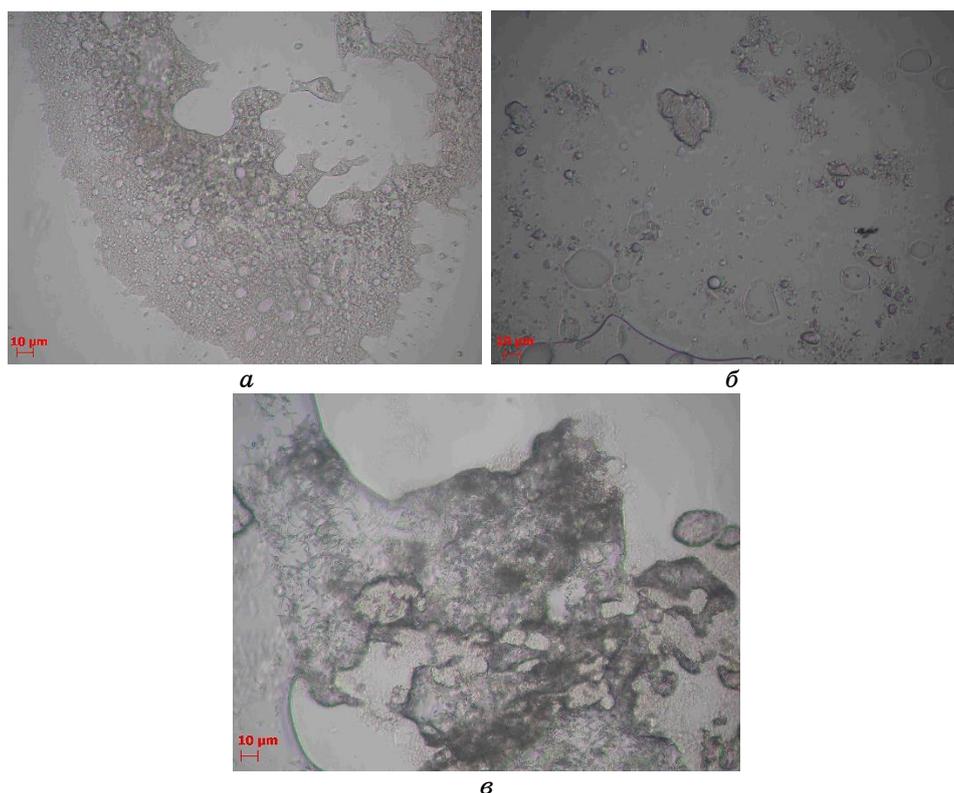
что для образца 3 — с наибольшим содержанием смеси кремнезёмов, не обнаружено появление вторичной микрофлоры даже за 5 месяцев эксперимента (см. рис. 4). В то же время для образцов без кремнезёмов в присутствии бактерий (образцы 1К–3К) вторичная микрофлора выявлена на 20 сутки, что сопровождается максимумом оптической плотности. Это указывает на то, что гидрофильный кремнезём А-300 в составе образцов 1, 2 способствует жизнедеятельности микроорганизмов, вероятно, за счёт повышения проницаемости клеточных мембран для питательных веществ и продуктов клеточного метаболизма [27, 28]. Отсутствие вторичной микрофлоры способствует активизации жизнедеятельности бактерий, интенсификации их метаболизма и уменьшению концентрации углеводов в воде. То есть, внесение такого композита в окружающую среду будет обеспечивать полное восстановление равновесия экосистемы, которая существовала до загрязнения без нарушения природного биоценоза и предупреждать вторичное загрязнение окружающей среды нефтепродуктами, которые могут накапливаться на дне водоёмов.

Для композита уже на 14 сутки (образец 3) отмечено полное исчезновение масляного пятна на поверхности воды по сравнению с образцами 1 и 2, для которых моторное масло, полностью смоченное нанокремнезёмом, продолжает находиться в пробе.

Выявлено, что в опытных композитных системах (образцы 1–3) при утилизации углеводов моторного масла на 23 сутки на водной поверхности появляется тонкая прозрачная плёнка из вегетативных клеток *Bacillus*. Для образца с наибольшим содержанием смеси кремнезёмов (образец 3) в отличие от образца 3К, содержавшего чистую культуру бактерий, обнаружено наличие бактерий рода *Bacillus* даже на 146 сутки проведения эксперимента (рис. 5, а, в), то есть кремнезём в составе композита стимулирует жизнедеятельность бактерий *Bacillus*. О большей эффективности композита по сравнению с бактериями в чистом виде свидетельствуют и данные работ [5, 29, 30], в которых установлено, что рост бактерий находился на высоком уровне только в течение 30–35 дней инкубации, а в составе композитной системы с кремнезёмами время увеличивается больше, чем в 4 раза.

На рисунке 5, б приведены микрофотографии агрегатов смеси кремнезёмов с моторным маслом в водной среде.

Начиная с 31 суток, зафиксировано медленное погружение всех опытных образцов под слой воды, а с 63 суток они начинают опускаться на дно стакана и на 146 сутки (то есть 5-й месяц исследования) полностью находятся под толщей воды на дне (за исключением образца 3, 40% которого остаётся на поверхности воды). Это, скорее всего, связано с отмиранием клеток в фазе распада и характеризуется наличием минимума оптической плотно-



**Рис. 5.** Микрофотографии образцов, что содержат чистую культуру био-препарата (*а*), смесь кремнезёмов без бактерий (*б*) и в присутствии бактерий (*в*) в водной среде с моторным маслом.<sup>6</sup>

сти (см. рис. 3). Для контрольных образцов без бактерий на пятый месяц проведения эксперимента: для образца *1КР* наблюдали оседание на дно около 50% смеси кремнезёмов, для образца *3КР* — 30%, в отличие от образца *2КР*, который продолжал находиться на поверхности воды.

Вследствие жизнедеятельности клеток происходит истощение среды и накопление ядовитых веществ продуктов обмена, что приводит к замедленному их делению и гибели. Полная деструкция масла бактериями в составе исследованных композитных систем (образцы *1* и *2*) завершается на 146 сутки.

#### 4. ВЫВОДЫ

Таким образом, биокомпозит на основе гидрофильного и гидрофобного кремнезёмов и бактерий рода *Bacillus*, представляет со-

бой эффективный биодеструктор углеводородов моторного масла в водной среде. Это может быть использовано для экономически выгодного и экологически чистого метода биоремедиации. Для опытного образца с наибольшим содержанием смеси кремнезёмов полная деструкция масла отмечена на 14 сутки, а наличие вторичной микрофлоры не наблюдалось даже через 5 месяцев проведения эксперимента. Показано, что деление бактериальных клеток происходит активнее в составе композита, а сам кремнезём выступает активным биостимулятором жизнедеятельности бактерий *Bacillus*, что в конечном результате сказывается на полноте биодеградации моторного масла.

Установлено, что адсорбция моторного масла на минеральном композите пропорциональна его количеству, а присутствие бактерий в составе композитной системы уменьшает его адсорбционную способность. По сравнению с чистой культурой биопрепарата утилизация моторного масла биокомпозитом осуществляется значительно эффективнее. То есть предлагаемая система может быть рекомендована для практического применения.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. A. Bumpus, *Appl. Environ. Microbiol.*, **55**, No. 1: 154 (1989).
2. A. R. Clemente, T. A. Anazawa, L. R. Durrant, *Braz. J. Microbiol.*, **32**, No. 4: 255 (2001); <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-83822001000400001>.
3. Д. В. Федюкина, Г. Г. Трохименко, *Електронний вісник НУЖ*, № 5 (2010); <http://evn.nuos.edu.ua/article/viewFile/25096/22520>.
4. I. B. Ivshina, M. S. Kuyukina, A. V. Krivoruchko, A. A. Elkin, S. O. Makarov, C. J. Cunningham, T. A. Peshkur, R. M. Atlas, and J. C. Philp, *Environ Sci. Process Impacts*, **17**, No. 7: 1201 (2015); <https://doi.org/10.1039/c5em00070j>.
5. S. Nimrat, S. Lookchan, T. Boonthai, and V. Vuthiphandchai, *African J. Biotechnol.*, **18**, No. 23: 494 (2019); <https://doi.org/10.5897/AJB2019.16822>.
6. М. В. Двадненко, Р. В. Маджигатов, Н. А. Ракитянский, *Международ. журн. эксперимент. образов.*, **3**: 89 (2017).
7. L. S. Hagwell, L. M. Delfino, and J. J. Rao, *Environ. Sci. Technol.*, **26**, No. 11: 2104 (1992); <https://doi.org/10.1021/es00035a005>.
8. S. Boonchan, M. L. Britz, and G. A. Stanley, *Appl. Environ. Microbiol.*, **66**, No. 3: 1007 (2000); <https://doi.org/10.1128/aem.66.3.1007-1019.2000>.
9. І. П. Козлова, О. С. Радченко, Л. Г. Степура, Т. О. Кондратюк, *Геохімічна діяльність мікроорганізмів та її прикладні аспекти* (Київ: Наукова думка: 2008).
10. Н. М. Привалова, М. В. Двадненко, А. А. Некрасова, О. С. Попова, Д. М. Привалов, *Научный журнал КубГАУ*, **113**, № 9: 307 (2015).
11. Т. Ю. Коршунова, С. Р. Мухаматдьярова, О. Н. Логинов, *Известия Уфимского научного центра РАН*, **2**: 90 (2013).
12. О. Л. Матвеева, О. Р. Алієва, *Проблеми екологічної біотехнології*, № 1

- (2014); [http://nbuv.gov.ua/UJRN/peb\\_2014\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/peb_2014_1_4).
13. О. А. Гоголева, Н. В. Немцева, *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*, **2**: 1 (2012).
  14. Нр. Kaur, S. Kaur, and J. Bansal, *International J. Biol. Pharm. and Allied Sci. (IGBPAS)*, **3**, No. 9: 2119 (2014).
  15. О. В. Жукова, Н. В. Морозов, *Вестник ТГГПУ*, **21**, No. 3: 99 (2010).
  16. М. Р. Antić, В. S. Jovancićević, М. Пис, М. М. Vrvic, and J. Schwarzbauer, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, **13**, No. 5: 320 (2006); <http://dx.doi.org/10.1065/espr2006.03.296>.
  17. А. Д. Ніколайчук, М. Т. Картель, *Сорбент для очистки поверхні води від нафти та нафтопродуктів* (Патент України на винахід 95035, МПК В01J20/20, С02F1/28 (Опубл. 25.06.2011, Бюлетень № 12) (2011)).
  18. Е. Е. Сироткина, Л. Ю. Новоселова, *Химия в интересах устойчивого развития*, **13**: 359 (2005).
  19. Г. Д. Чукин, *Химия поверхности и строение дисперсного кремнезёма* (Москва: Типография Паладин-ООО «Принта»: 2008).
  20. Н. Ю. Клименко, И. В. Сиора, Е. А. Новикова, А. П. Головань, Т. В. Крупская, Л. А. Суворова, В. В. Туров, *Химия и технология воды*, **39**, № 4: 377 (2017).
  21. L. A. Nwaogu, G. O. C. Onyeze, and R. Nwabueze, *African J. Biotechnol.*, **7**, No. 12: 1939 (2008); <https://doi:10.5897/AJB07.889>.
  22. М. А. Водянова, Е. И. Хабарова, Л. Г. Донерьян, *Горный информационно-аналитический бюллетень*, **7**: 253 (2010).
  23. Г. Ф. Лакин, *Биометрия* (Москва: Высшая школа: 1990).
  24. К. М. Векірчик, *Мікробіологія з основами вірусології* (Київ: Либідь: 2001).
  25. F. A. Bezza and E. M. N. Chirwa, *Biochem. Eng. J.*, **101**: 168 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.05.007>.
  26. P. Parthipan, E. Preetham, L. L. Machuca, P. K. S. M. Rahman, K. Murugan, and A. Rajasekar, *Front. Microbiol.*, **8**: 193 (2017); <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00193>.
  27. Т. В. Крупская, В. М. Гунько, В. Н. Барвинченко, В. В. Туров, О. В. Шпульга, *Укр. хім. журн.*, **74**, № 2: 84 (2008).
  28. Н. Ю. Клименко, И. В. Сиора, Е. А. Новикова, А. П. Головань, Т. В. Крупская, В. В. Туров, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **8**, № 2: 214 (2017); <https://doi:10.15407/hftp08.02.214>.
  29. K. Das and A. K. Mukherjee, *Bioresour Technol.*, **98**, No. 7: 1339 (2007); <https://doi:10.1016/j.biortech.2006.05.032>.
  30. M. N. Raju, R. Leo, S. S. Herminia, R. E. Morán, K. Venkateswarlu, and S. Laura, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **98**, No. 5: 698 (2017); <https://doi:10.1007/s00128-017-2039-0>.

## REFERENCES

1. J. A. Bumpus, *Appl. Environ. Microbiol.*, **55**, No. 1: 154 (1989).
2. A. R. Clemente, T. A. Anazawa, and L. R. Durrant, *Braz. J. Microbiol.*, **32**, No. 4: 255 (2001); <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-83822001000400001>.
3. D. V. Fediukina and H. H. Trokhymenko, *Elektronnyi Visnyk NUK*, No. 5

- (2010); <http://evn.nuos.edu.ua/article/viewFile/25096/22520>.
4. I. B. Ivshina, M. S. Kuyukina, A. V. Krivoruchko, A. A. Elkin, S. O. Makarov, C. J. Cunningham, T. A. Peshkur, R. M. Atlas, and J. C. Philp, *Environ Sci. Process Impacts*, **17**, No. 7: 1201 (2015); <https://doi:10.1039/c5em00070j>.
  5. S. Nimrat, S. Lookchan, T. Boonthai, and V. Vuthiphandchai, *African J. Biotechnol.*, **18**, No. 23: 494 (2019); <https://doi.org/10.5897/AJB2019.16822>.
  6. M. V. Dvadnenko, R. V. Madzhyhatov, and N. A. Rakytiatskiy, *Mezhdunar. Zhurn. Ehksperiment. Obrazov.*, **3**: 89 (2017) (in Russian).
  7. L. S. Hagwell, L. M. Delfino, and J. J. Rao, *Environ. Sci. Technol.*, **26**, No. 11: 2104 (1992); <https://doi.org/10.1021/es00035a005>.
  8. S. Boonchan, M. L. Britz, and G. A. Stanley, *Appl. Environ. Microbiol.*, **66**, No. 3: 1007 (2000); <https://doi:10.1128/aem.66.3.1007-1019.2000>.
  9. I. P. Kozlova, O. S. Radchenko, L. H. Stepura, and T. O. Kondratiuk, *Heokhimichna Diyalnist Mikroorhanizmiv ta II Prykladni Aspekty* (Kyiv: Naukova Dumka: 2008) (in Ukrainian).
  10. N. M. Pryvalova, M. V. Dvadnenko, A. A. Nekrasova, O. S. Popova, and D. M. Pryvalov, *Nauchnyi Zhurnal KubGAU*, **113**, No. 9: 307 (2015) (in Russian).
  11. T. Yu. Korshunova, S. R. Mukhamatdiarova, and O. N. Lohynov, *Izvestiya Ufimskogo Nauchnogo Tsentra RAN*, **2**: 90 (2013) (in Russian).
  12. O. L. Matveyeva and O. R. Alieva, *Problemy Ehkolohichnoi Biotekhnologii*, No. 1 (2014) (in Ukrainian); [http://nbuv.gov.ua/UJRN/peb\\_2014\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/peb_2014_1_4).
  13. O. A. Gogoleva and N. V. Nemtseva, *Byulleten Orenburgskogo Nauchnogo Tsentra UrO RAN*, **2**: 1 (2012) (in Russian).
  14. Hp. Kaur, S. Kaur, and J. Bansal, *International J. Biol. Pharm. and Allied Sci. (IGBPAS)*, **3**, No. 9: 2119 (2014).
  15. O. V. Zhukova and N. V. Morozov, *Vestnik TGGPU*, **21**, No. 3: 99 (2010) (in Russian).
  16. M. P. Antić, B. S. Jovancićević, M. Ilic, M. M. Vrvic, and J. Schwarzbauer, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, **13**, No 5: 320 (2006); <http://dx.doi.org/10.1065/espr2006.03.296>.
  17. A. D. Nikolaichuk and M. T. Kartel, *Sorbent dlia Ochystky Poverkhni Vody vid Nafty ta Naftoproduktiv* (Patent Ukrayiny na Vynakhid 95035, MPK V01J20/20, S02F1/28 (Opubl. 25.06.2011, Byuleten No. 12) (2011)) (in Ukrainian).
  18. E. E. Sirotkina and L. Yu. Novoselova, *Khimiya v Interesakh Ustoichyogo Razvitiya*, **13**: 359 (2005) (in Russian).
  19. G. D. Chukin, *Khimiya Poverkhnosti i Stroyenie Dispersnogo Kremnezyoma*, (Moscow: Typografiya Paladin–OOO ‘Printa’: 2008) (in Russian).
  20. N. Yu. Klimenko, Y. V. Siora, E. A. Novikova, A. P. Golovan, T. V. Krupskaya, L. A. Suvorova, and V. V. Turov, *Khimiya i Tekhnologiya Vody*, **39**, No. 4: 377 (2017) (in Russian).
  21. L. A. Nwaogu, G. O. C. Onyeze, and R. Nwabueze, *African J. Biotechnol.*, **7**, No. 12: 1939 (2008); <https://doi:10.5897/AJB07.889>.
  22. M. A. Vodyanova, E. Y. Khabarova, and L. H. Donerian, *Gornyi Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten*, **7**: 253 (2010) (in Russian).
  23. H. F. Lakyn, *Biometriya* (Moscow: Vysshaya Shkola: 1990) (in Russian).

24. K. M. Vekirchuk, *Mikrobiolohiia z Osnovamy Virusolohii* (Kyiv: Lybid: 2001) (in Ukrainian).
25. F. A. Bezza and E. M. N. Chirwa, *Biochem. Eng. J.*, **101**: 168 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.05.007>.
26. P. Parthipan, E. Preetham, L. L. Machuca, P. K. S. M. Rahman, K. Murugan, and A. Rajasekar, *Front. Microbiol.*, **8**: 193 (2017); <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00193>.
27. T. V. Krupskaya, V. M. Gunko, V. N. Barvinchenko, V. V. Turov, and O. V. Shulga, *Ukr. Khim. Zhurn.*, **74**, No. 2: 84 (2008) (in Russian).
28. N. Yu. Klimenko, Y. V. Siora, E. A. Novikova, A. P. Golovan, T. V. Krupskaya, and V. V. Turov, *Khimiya, Fizyka ta Tekhnolohiya Pov-erkhni*, **8**, No. 2: 214 (2017) (in Russian); <https://doi:10.15407/hftp08.02.214>.
29. K. Das and A. K. Mukherjee, *Bioresour Technol.*, **98**, No. 7: 1339 (2007); <https://doi:10.1016/j.biortech.2006.05.032>.
30. M. N. Raju, R. Leo, S. S. Herminia, R. E. Morán, K. Venkateswarlu, and S. Laura, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **98**, No. 5: 698 (2017); <https://doi:10.1007/s00128-017-2039-0>.

---

*O. O. Chuiko Institute of Surface Chemistry, N.A.S. of Ukraine,  
17, General Naumov Str.,  
UA-03164 Kyiv, Ukraine*

<sup>1</sup> Fig. 1. SEM microphotos of hydrophilic (a) and hydrophobic (б) silicas; TEM microphotos of the mixture of silicas (A-300/AM1-300 at a ratio of 50/50) (e).

<sup>2</sup> TABLE. The quantitative composition of the samples.

<sup>3</sup> Fig. 2. The microphotos of the biological preparation (a) and the composite system (б) based on it (magnification  $\times 40$ , transmission).

<sup>4</sup> Fig. 3. Dependence of the optical density of the suspension of *Bacillus* bacterial cells, in the presence of motor oil, on the time of bacterial cell cultivation at various contents of the biological product in the nanocomposite: 1–3—samples 1–3 (a); 4–6—samples 1K–3K (б).

<sup>5</sup> Fig. 4. Photos illustrating the destruction of motor oil on the 146th day of the experiment by using the following samples: the samples containing the mixture of nanosilicas and bacteria (samples 1–3), the samples containing bacteria without nanosilicas (samples 1K–3K), the samples containing nanosilicas without bacteria (samples 1KP–3KP).

<sup>6</sup> Fig. 5. The microphotos of the samples containing the pure bacterial culture of the biological preparation (a), the mixture of nanosilicas without bacteria (б), and the mixture of nanosilicas with bacteria (e) with motor oil in the aqueous medium.