

89. Kroer N., Barkay t., Sorensen S., Weber D. Effect of root exudates and bacterial metabolic activity on conjugal gene transfer in the rhizosphere of marsh plant. // FEMS Microbiol. Ecol., 1998. V. 25. P. 375-384.
90. Normander B., Christensen B.B., Molin S., Kroer N. Effect of bacterial distribution and activity on conjugal gene transfer on the phylloplane of the bush bean (*Phaseolus vulgaris*). Appl. Environ. Microbiol., 1998. V. 64. P. 1902-1909.
91. Denny T.P. Involvement of bacterial polysaccharides in plant pathogenesis. // Annu. Rev. Phytopathol., 1995. V. 33, P. 173-197.
92. Reinhold-Hurek B., Hurek T. Life in grasses: diazotrophic endophytes // Trends Microbiol., 1998. № 6. P. 139-144.
93. Costerton J.W., Lewandowski Z., Caldwell D.E., Korber D.R., Lappin-Scott H.M. Microbial biofilms. // Annu. Rev. Microbiol., 1995. № 49. P. 711-745.
94. Pawlowski K., Bisseling T. Rhizobial and actinorhizobial symbioses: What are the shared features? // Plant Cell, 1996. V. 8. P. 1899-1913.
95. Preston G.M., Haubold B., Rainey P.B. Bacterial genomics and adaptation to life on plants: implications for the evolution of pathogenicity and symbiosis // Curr. Opin. Microbiol., 1998. 1. P. 589-597.
96. Dangel J.L. Bacterial Pathogenesis of Plants and Animals. 1994. Berlin: Springer-Verlag. 343 p.
97. Douglas A.E. Symbiotic interactions. Oxford N.Y.; Toronto: Oxford Univ. Press, 1994. 148 p.
98. Beattie G.A., Lindow S.E. Bacterial colonization of leaves: a spectrum of strategies // Phytopathology, 1999. V. 89. P. 353-359.
99. Чумаков М.И. Оценка эффективности ассоциативного взаимодействия *Agrobacterium radiobacter* 5Д-1 с пшеницей // Молекулярные основы взаимоотношений ассоциативных микроорганизмов с растениями. М.: Наука, 2005. С. 160-179.
100. Costacurta A., Vanderleyden J. Synthesis of phytohormones by plant-associated bacteria // Crit. Rev. Microbiol., 1995. V. 21, № 8. P. 1-8.
101. Bloumberg G., Lugtenberg B.J.J. Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria // Curr. Opin. Plant Biol., 2001. V. 4. P. 343-350.
102. Проворов Н.А. Молекулярные основы симбиогенной эволюции: от свободноживущих бактерий к оргanelлам // Журн. общ. биол. 2005. Т. 66, № 5. С. 371-388.
103. Tikhanovich I.A., Kozhemyakov A.P., Provorov N.A. et al. Genetic potential of plants for improving the beneficial microbe interaction // Biological Fixation of Nitrogen for Ecology and Sustainable Agriculture. Berlin; Heidelberg, 1997. P. 191-194.
104. Назаров А.В., Иларионов С.А. Потенциал использования микробно-растительного взаимодействия для биоремедиации // Биотехнология, 2005. № 5. С. 54-62.

УДК 542.65:576.8.093

Экологический аспект феномена микроорганизм-ассоциированного кристаллогенеза

© 2008. А. К. Мартусевич¹, О. Б. Жданова²

¹Нижегородский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии

²Вятская государственная сельскохозяйственная академия

Наряду с уже установленным фактом кристаллообразования как производной исходных растворов солей и органических соединений совершенно неизученной проблемой является гипотетическая роль микроорганизмов как инициаторов кристаллогенеза. Статья включает данные об участии в кристаллогенезе бактерий, вирусов, грибов. Современное состояние этой проблемы позволяет сделать вывод о том, что медико-биологическая значимость микробной инициации кристаллогенеза практически не описана.

The fact of crystallogenesis initiation by means of salt connections and organic connections has already been stated. But the hypothetic role of microorganisms in crystallogenesis initiation has not been studied. The article includes the data dealing with bacteria, viruses, fungi participation in crystallogenesis. Modern state of the problem shows that medicine-biological importance of microbial crystallogenesis initiation has not yet been scrutinized.

Значение кристаллографии, как науки, вытекает из чрезвычайной распространенности кристаллического состояния вещества. Так как с кристаллами приходится иметь дело практически во всех сферах человечес-

кой деятельности, то развитие почти каждой отрасли народного хозяйства выдвигает целый ряд важных кристаллографических задач. Сюда относится, прежде всего, задача получения высококачественных кристалли-

ческих материалов, необходимых для удовлетворения потребностей новой и новейшей техники. Искусственные алмазы, кварц, рубин, многочисленные полупроводники, люминесцентные кристаллы и др. уже широко используются в обрабатывающей и оптической промышленности, в радиоэлектронике и компьютерах, в космических исследованиях и ультразвуковой технике. Однако бурное развитие науки и техники требует всё новых видов кристаллических материалов, в том числе металлов и сплавов, обладающих теми или иными нужными свойствами [1]. Решение этой проблемы требует тщательного изучения процессов образования, роста и разрушения кристаллов, а также исследования кристаллических структур, в геометрии которых кроется одна из основных причин физических и химических особенностей кристаллов [2, 3].

К вопросу о микробной инициации кристаллогенеза

Наблюдая регулярные фигуры при кристаллизации соли из водного раствора, ещё И. Ньютон предположил, что в растворах до кристаллизации существует значительная упорядоченность молекул соли. Исследования последних лет подтвердили этот факт для многих веществ и их состояний. Эти упорядоченные микровключения, химически или структурно соответствующие фазам, образующимся в матрице при фазовых переходах (ФП), часто и являются зародышами новых фаз [4]. Многочисленные эксперименты показывают, что ФП между различными структурами ускоряются внешней деформацией или напряжениями от деформации несоответствия структур (ДНС) на границах фаз (например, ДНС порождает пластически деформированный слой на границе плёнка – подложка при эпитаксии, который изменяет структуру пленки или её вязкость, способствует конформационным перестройкам молекул на границе кристалл-органическое вещество. Решающее влияние деформации матрицы (вязкости для жидкости) вокруг зародышей новой фазы при ФП подтверждает строгая корреляция параметров фаз для разных веществ. Механические воздействия на систему фаз всегда порождают рост одних фаз за счёт других, вплоть до создания химических соединений при их взаимном проникновении (механическое сплавление, акустохимия). Корреляция параметров дефор-

мации разных веществ в масштабах наблюдения от атомного до макроскопического позволяет применить хорошо изученные закономерности микро- и макродеформации к структурным (конформационным) изменениям в масштабах групп атомов, макромолекул и фрагментов клеток.

Наряду с уже установленным фактом кристаллообразования как производной исходных растворов солей и органических соединений, слабо изученной проблемой является гипотетическая роль микроорганизмов как инициаторов кристаллогенеза. В отдельных работах была показана способность магнетотактических бактерий к активации кристаллообразования по типу полиморфных одиночных кристаллов вблизи их и даже внутриклеточно. В работах [5 – 8] впервые описан дендритный кристаллогенез (фигуры типа «розеток») вокруг бактерий родов *Providencia* и *Morganella* в дне язвы желудка. Эти немногочисленные факты, а также сообщения о паразитарном кристаллогенезе [9 – 12] косвенно указывают на способность метаболитов бактерий выступать в качестве активаторов или ингибиторов кристаллообразования. Приведённые выше данные позволяют рассчитывать на возможность индикации присутствия микроорганизмов на различных поверхностях по их специфической метаболит-обусловленной трансформации результатов кристаллообразования смылов с тестируемых образцов [13].

Особым аспектом проблемы биокристаллизации, ассоциированной с микроорганизмами, является возможность последних способствовать не только кумуляции металлов в кристаллической форме, но и обуславливать кристаллогенез органических соединений. Преимущественно этот феномен касается белковых макромолекул. Так, группой исследователей Санкт-Петербургского института ядерной физики была показана способность ДНК бактерий в определённых условиях (в частности, повышенного радиационного фона) окружать себя особым белком RecA, обеспечивающим радиорезистентность прокариотической клетки [14, 15]. Данное явление, по мнению авторов, имеет защитно-приспособительное значение, т. к., с одной стороны, обеспечивает механическую (сохранение нативной конформации), химическую (связывание и поддержание химической структуры) и биологическую (обеспечение функционирования генома) протекцию генетического материала микроорганиз-

ма от повреждающего действия радиации, а, с другой стороны, предохраняет ДНК от первично носящей репаративный характер гиперрекомбинации, которая может необратимо изменить генетическую информацию и привести к гибели микроорганизма.

Способность бактерий к метаболическому влиянию на характер кристаллообразования может быть объяснена с позиций биохимии микроорганизмов. В частности, определённую роль в этом процессе играет микробиологический синтез структурных элементов или продуктов метаболизма микроорганизмов за счёт присущих микробной клетке ферментных систем. Большинство продуктов микробиологического синтеза обладают физиологической активностью.

За счёт высокой активности специфических энзиматических систем микроорганизмы оказываются способными осуществлять ряд реакций на молекуле органического соединения, не меняя его основной структуры. Наиболее изучены реакции на молекулах стероидных соединений. В строго определённых положениях осуществляются реакции дегидрирования, дезацетилирования и гидроксирования, в результате чего меняется физиологическая активность исходного стероидного соединения. Благодаря подбору соответствующих микроорганизмов – носителей специфических ферментных систем – метод микробиологической трансформации получает значительное распространение [16, 17].

Дополнительным доказательством метаболической активности микроорганизмов в отношении инициации или ингибирования кристаллообразования являются работы в области растениеводства. Показано, что одним из основных звеньев патогенеза некоторых бактериальных заболеваний растений служит кристаллогенез. В частности, к примерам подобного явления относится эпифитная бактерия *Pseudomonas syringae*, способная развиваться в весенний период на почках, листьях и цветах фруктовых деревьев. Клетки бактерии служат центрами кристаллизации льда при заморозках, что вызывает ожоги и пятнистость. В свою очередь, образование льда приводит к механическому разрушению клеток растения, проникновению в них бактерий и развитию заболевания. Продемонстрировано, что в отсутствие данного вида псевдомонад ожоги не образуются [18]. Кроме того, дальнейшие исследования по получению мутационных форм *P. syringae* позволили получить варианты бактерий, не

образующие кристаллов льда. В пособии [19] рассматриваются возможности практического применения данных результатов: предлагается использование мутантных форм псевдомонад путем опрыскивания их гомогенатами фруктовых деревьев при угрозе заморозков. Бактерии заселяют растение и препятствуют появлению на нем других форм микроорганизма, а, следовательно, и развитию заболевания.

Микроорганизмы – бактерии, плесени, микроскопические водоросли, обитающие в почве, пресноводных водоемах и морской воде, обладают максимальными возможностями по извлечению металлов из окружающей среды. Плесневые грибы аспергиллы содержат до 0,3% меди – в 30000 раз больше, чем в окружающей среде. Многие бактерии в больших количествах накапливают уран: пресноводная микроводоросль хлорелла – до 0,4% сухой массы, актиномицеты – до 4,5%, денитрифицирующие бактерии – 14%, а специально отобранные культуры дрожжей или псевдомонад – до 50%.

Механизмы накопления металлов микробными клетками всё ещё очень мало изучены, и исследователи, работающие в этой области, то и дело наталкиваются на совершенно новые факты. Недавно группа канадских учёных опубликовала очень интересные данные о бактерии *Bacillus subtilis*. При выращивании этой бактерии в растворе хлористого золота на ее стенках образуются микрокристаллы чистого металлического золота. Выяснилось, что накопление металла происходит в два этапа. Сначала катионы Au^{3+} , находящиеся в растворе, взаимодействуют с отрицательно заряженными группами макромолекул, входящих в состав клеточной стенки бактерии. При этом возникают своеобразные ядра кристаллизации, на которых затем быстро осаждаются металлы из раствора. Кроме золота, сенная палочка может извлекать из раствора ещё около 40 металлов [20].

Золото и большинство других металлов, которые накапливают в своих клетках микроорганизмы, относят к группе «тяжёлых». Проникая в живые клетки, они нарушают их жизнедеятельность: инактивируют ферменты, вызывают разрывы в цепях нуклеиновых кислот и т. д. Металлы могут сорбироваться на клетках микроорганизмов именно потому, что они токсичны и поэтому требуют нейтрализации. Установлено, что токсическое действие тяжёлых металлов реализуется лишь в их ионизированной форме. При связывании

металлы лишаются токсических свойств, что отчасти напоминает механизм самозащиты, выработанный некоторыми морскими водорослями, которые способны обезвреживать токсичные соединения мышьяка, связывая их с промежуточными продуктами фотосинтеза и откладывая в клеточных мембранах в виде безвредных производных. В данном случае имеет место подобная ситуация: металл, концентрирующийся в клеточной стенке микроорганизма в кристаллическом виде или в виде плохо растворимых соединений, не оказывает токсического действия на него.

По-видимому, это не единственная причина накопления металлов. Отложения металла могут являться результатом метаболизма самих бактерий. Примером могут выступать железо- и марганецокисляющие микроорганизмы. Для их нормального функционирования необходимым условием представляется наличие в среде готовых органических веществ, которые в естественных условиях часто представлены металл-органическими комплексами. В подобных соединениях металл, с позиции бактерии, оказывается балластным веществом (образно говоря, «косточка в вишне»), в связи с чем бактерия откладывает его на своей клеточной стенке.

Металл не всегда является для микроорганизмов ненужным балластом. Некоторые металлы необходимы микробам постоянно или на определенных этапах развития. Так, известный азотфиксирующий микроорганизм – азотобактер нуждается в железе, без которого не может функционировать принципиально важный для его жизнедеятельности железосодержащий фермент нитрогеназа. Металлы могут входить в состав различных внутриклеточных транспортных систем, поддерживать определенный ионный состав клеток. Во всех случаях способность накапливать металл оказывается для микроорганизма полезным свойством.

Металлы могут играть важную роль и в экологических взаимоотношениях микроорганизмов. Примером может служить обитающая в Атлантике, у берегов Флориды, цианобактерия *Gomphosphaeria aponia*. Для своей жизнедеятельности она нуждается в железе, которое запасает в резерв, откладывая в виде гидроокисей на своей клеточной оболочке. Такая способность даёт ей преимущество перед живущей в тех же водах нитчатой водорослью *Gymnodinium breve*, которая также нуждается в железе, но накапливать его впрямь не может. Поэтому размножение цианобактерий приводит к массовой гибели их конкурентов.

Совершенно особую роль играет способность к накоплению металла в экологии недавно обнаруженной группы пресноводных бактерий, обладающих свойством магнетотаксиса – движения вдоль силовых линий магнитного поля. Эти бактерии содержат цепочки магнетосом – скоплений магнетита, диаметром до 500 ангстрем, которые, как магнитная стрелка, ориентируют бактерию в пространстве и определяют направление её передвижения в воде. Вследствие того, что силовые линии земного магнитного поля ориентированы не строго горизонтально, а наклонены под тем или иным углом (так называемое «магнитное наклонение»), бактерия, стремясь плыть к северу, в северном полушарии «зарывается» в толщу воды, где, по-видимому, находит оптимальные условия для своего развития. Подобные же бактерии, обнаруженные в южном полушарии, передвигаются в сторону не северного, а южного полюса.

Микроорганизмы, накапливающие железо и марганец, играют важную роль в почвообразовательных и геохимических процессах, участвуя в образовании скоплений железо-марганцевых конкреций на дне океанов, широкая промышленная разработка которых, как ожидают, может начаться уже в ближайшее время.

Накопление микроорганизмами металлов иногда может представлять для различных звеньев экологических систем и большую опасность. В особенности это касается накопления радиоизотопов и некоторых алкилированных соединений металлов, представляющих собой крайне ядовитые вещества [21].

Влияние метаболитов *Escherichia coli* на характер кристаллообразования органических соединений был продемонстрирован в отношении основного фуксина. В процессе работы над оптимизацией среды для культивирования питательных сред для грамотрицательных бактерий было показано, что при разложении лактозы до альдегида и кислоты происходит освобождение фуксина из фуксин-сульфитного комплекса, усиливающее красное окрашивание колоний. У кишечной палочки эта реакция очень выражена и сопровождается кристаллизацией фуксина, что проявляется зеленоватым металлическим блеском (фуксиновый глянец) колоний. В этом случае микроорганизмы выступают в качестве инициаторов кристаллообразования.

Роль микробной инициации кристаллогенеза в нанотехнологии

Способность микроорганизмов оказывать влияние на процесс кристаллообразования имеет большое значение в биотехнологии для создания новых материалов. Микроорганизмы способны не только вырабатывать различные нужные для современных технологий вещества, но и сами могут служить важными компонентами новых материалов.

В частности, описаны возможности использования микроорганизмов для сборки кристаллов в сложные геометрические структуры или в качестве живой матрицы для роста кристаллов. Новые способы управления ростом кристаллов вызвали значительный интерес среди материаловедов, так как была чётко подтверждена теснейшая связь между структурой материала и его свойствами. Размеры некоторых микроорганизмов, например, вирусов, не превышают нескольких десятков нанометров в длину. До сих пор не удаётся получить однородные синтетические частицы таких размеров. Микроорганизмы же достаточно доступны, имеют одинаковый размер, и приёмы работы с ними относительно просты. Как правило, для жизнеобеспечения микроорганизмов требуются умеренные температура, давление и кислотность среды. Поэтому микробы – идеальные кандидаты для разработки новых экологически чистых технологий, взамен прежних процессов, где часто применяются высокие температуры, давление и агрессивные среды.

Многие микроорганизмы вырабатывают неорганические вещества. Одноклеточные диатомовые водоросли производят кремнезём, состав которого соответствует обычному стеклу. Другие микроорганизмы способны образовывать из оксидов железа микроскопические магнитные частицы. Некоторые микроорганизмы способны усваивать соединения металлов и затем в процессе биосинтеза накапливать металл в виде структур со строгой пространственной конфигурацией.

В 1999 г. была опубликована статья группы исследователей из Университета города Уппсала (Швеция), в которой описан биосинтез кристаллов солей серебра бактериями *Pseudomonas stutzeri* штамма AG259. Этот вид бактерий обитает на месторождениях серебряных руд. В процессе метаболизма между цитоплазматической мембраной и клеточной стенкой бактерий, в основном, у полюсов клетки, образуются кристаллы солей серебра

размером до 200 нм. Было показано, что бактерии способны образовывать не менее трёх различных типов кристаллов с чёткой пространственной структурой. Предполагалось, что, изменяя условия культивирования бактерий, можно будет синтезировать кристаллы с заданными параметрами. Возможность получать микрокристаллы серебра размером несколько нанометров чрезвычайно важна для микроэлектроники. Искусственное получение подобных микрокристаллов отличается малой производительностью при высоких затратах.

Необычные способности микроорганизмов можно усилить методами генной инженерии. В 2000 г. группа исследователей из Копенгагенского университета опубликовала данные о регуляторном воздействии белков на процесс роста кристаллов. Было показано, что на поверхности клеток генетически модифицированной бактерии *Escherichia coli* вырабатываются белки, способные связываться с частицами золота. По меньшей мере три таких белка, выделенных из клеток *E. coli*, ускоряли кристаллизацию золота из раствора и определяли морфологию полученных кристаллов. Группа датских ученых работает над изучением бактериальных генов, ответственных за выработку белков, которые способны связываться с поверхностью различных неорганических материалов. В 2002 г. исследователи сообщили, что им удалось выделить из генетически модифицированной *E. coli* и изучить аминокислотный состав и структуру ряда белков, которые способны избирательно соединяться с определёнными гранями кристалла цеолита (неорганическое соединение алюминия и кремния, его пористые кристаллы используют в качестве фильтров и катализаторов). В настоящее время эта группа изучает генетически модифицированные штаммы *E. coli* в поисках белков, которые способны связываться с другими неорганическими соединениями, например, со слюдой. Такие белки могут стать полезными инструментами при создании новых материалов для полупроводниковых технологий, химического катализа и т. д.

Рядом работ показано, что центрами и/или инициаторами кристаллизации могут являться не только бактерии, но и грибы, вирусы, включая бактериофаги [22].

Достаточно перспективным, но малоизученным направлением представляется использование в нанотехнологии вирусов. Их применение может открыть новые подходы к направленному синтезу материалов.

Поскольку структуры белковых оболочек многих вирусов хорошо изучены даже на атомном уровне, они могут стать исключительно полезным инструментом для конструирования наноструктур.

В 2002–2003 гг. группой исследователей из Калифорнийского научно-исследовательского института был опубликован ряд сообщений о создании генетически модифицированного вируса мозаики коровьего горошка. Белковая оболочка вируса содержит остатки серосодержащих аминокислот, к которым впоследствии присоединяются частицы золота и флуоресцентные красители. Учёные предполагают использовать подобные конструкции как строительный материал для построения электрических схем или новых материалов. В настоящий момент в этой лаборатории ведётся работа ещё над несколькими видами вирусов. Руководитель исследования специально подчёркивает, что ни один из этих вирусов не способен инфицировать человека.

До настоящего времени не удалось синтезировать однородные стержнеобразные полимерные частицы размером с вирус, способные объединяться в структуры наподобие жидких кристаллов и при этом свободно перемещаться в растворе. Чтобы индуцировать процесс самоорганизации вирусных частиц, группа исследователей из Университета Брандейс (США) создаёт методами генной инженерии вирусы с частицами определённой длины. Затем суспензию вирусов смешивают с полимерными шариками и исследуют полученные структуры.

Сейчас уже используется технология самосборки для того, чтобы воздействовать на структуру создаваемых материалов вплоть до нанометрового уровня. Так, группа учёных под руководством А. М. Belcher использует частицы вируса, покрытые различными неорганическими материалами. Обработанные таким образом вирусы собираются в сложные пространственные структуры, которые представляют потенциальную ценность для создания оптических, магнитных и электронных устройств. В 2002 г. эта группа осуществила генетическую модификацию бактериофагов таким образом, чтобы на поверхности их белковой оболочки находились пептиды, способные связывать сульфид цинка или сульфид кадмия [21, 22]. При достаточно высокой концентрации частиц бактериофага в растворе они самостоятельно организовывались в структуру, в которой полупровод-

никовые кристаллы располагались по одной линии. Иными методами крайне трудно добиться такого расположения полупроводниковых материалов. Описанный метод позволяет организовывать вирусы в миниатюрные провода.

С помощью генной инженерии исследователи стремятся добиться того, чтобы вирус мог создавать оболочку из полупроводникового материала по всей длине образующейся цепочки, а на концах вирусной частицы находились определённые химические группы. Предполагается, что эти химические группы будут служить своеобразными «разъёмами», с помощью которых можно будет соединять покрытые полупроводниковым слоем вирусы в определённые структуры на плоскости. Таким путём можно будет создавать своего рода полупроводниковые схемы. Планируется найти способ объединять такие схемы в простейшие электронные устройства, размером на порядок меньше, чем обычные электронные чипы.

Вирусы, имеющие определённые химические группы на каждом конце, можно использовать и другим образом. Можно добиться, чтобы с одним концом вируса связывался магнитный материал, а с другим – какое-либо токсичное вещество. Теоретически такие конструкции можно будет применять для удаления токсичных примесей из раствора с помощью магнитного поля.

Группа учёных из Университета штата Монтана сосредоточила свои усилия на другом аспекте биологии вирусов. Белковую оболочку вируса можно модифицировать (химическим путём либо методами генной инженерии) с таким расчётом, чтобы к ней присоединялись частицы определённого вещества. Можно добиться управляемого «включения» и «выключения» связывающих механизмов, при этом частицы вещества будут попадать внутрь или выходить наружу.

Такие модифицированные вирусные оболочки могут служить для сборки новых материалов. Группа учёных под руководством М. Young ставит своей целью создание магнитных устройств для хранения информации путем включения в белковые структуры вирусов кристаллов магнетита или иного магнитного материала. Исследователям удалось выделить из бактерий и архебактерий белковые структуры, сходные с пространственной структурой молекулы ферритина – белка, который является резервным источником железа в клетках млекопитаю-

щих. Чередую белковые структуры вирусов и ферритиноподобные структуры, исследователи стремятся создать двумерные системы, которые можно будет использовать в магнитных устройствах для хранения информации.

Хотя с точки зрения создания экологически чистых производств достаточно умеренные условия жизнедеятельности микроорганизмов являются преимуществом, они могут стать препятствием для применения таких организмов в жёстких условиях многих современных производственных процессов [21, 23]. М. Young предлагает преодолеть эти препятствия двумя способами. Его сотрудники собирают образцы термофильных организмов в горячих источниках Йеллоустоунского Национального парка, а также подвергают белковые оболочки вирусов химической модификации, после чего вирусы становятся более устойчивыми к температуре и кислотности среды. На данный момент этой группе удалось выделить или создать искусственно белковые структуры, которые переносят интервал рН от 1 (сильнокислая среда) до 11 (сильнощелочная). Некоторые из этих структур выдерживают температуры более 100°C. После таких успехов можно ожидать, что микроорганизмы будут применяться для синтеза материалов в различных областях техники.

Предложен ещё один подход к созданию высокотехнологичных материалов: к наночастицам присоединяется одноцепочечная ДНК, которая может связываться с комплементарной последовательностью другой молекулы ДНК. Таким образом можно объединять наночастицы в двух- и трехмерные структуры, которые также могут быть полезны при конструировании электронных устройств.

Естественными «живыми матрицами» для создания материалов с заданными нано- и микрохарактеристиками являются грибы. Грибные гифы отличаются постоянством диаметра, а их толщина индивидуальна для каждого вида гриба. Исследователям из США удалось покрыть тонким слоем золота гифы. Для этого споры гриба *Aspergillus niger* культивировали в присутствии частиц золота размером 13 нм. Частицы оседали на поверхности гиф. К частицам золота были присоединены фрагменты одноцепочечной ДНК, что позволяло присоединять другие микроскопические объекты, на поверхности которых находились комплементарные фрагменты ДНК. Аналогичные манипуляции были произведены с другими видами грибов, которые

образуют гифы различного размера. Таким образом, можно конструировать достаточно сложные структуры из наночастиц.

Возможно также покрывать микроорганизмы слоем частиц, например, магнитного или полупроводникового материала. Было предложено также покрывать гифы слоем катализатора, что позволит обеспечить большую площадь контакта с катализатором для проведения химических реакций. С помощью грибов можно создавать материалы заданной наноструктуры для применения в оптике и электронике.

По-видимому, взаимосвязь между материаловедением и микробиологией будет еще более тесной. Применение микроорганизмов может существенно упростить разработку новых материалов, так как именно микроскопическое строение материала в конечном счете определяет его свойства [24 – 26].

Литература

1. Волчецкий А. Л., Рувинова Л. Г., Спасенников Б. А. и др. Кристаллизация и кристаллография: микробиологические аспекты. Архангельск, 1999. 374 с.
2. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1978. 512 с.
3. Мартюшев Л. М., Селезнев В. Д., Скопинов С. А. Изучение роста скелетного кристалла в двумерной среде с фазовым расслоением с помощью метода диффузных потоков // Письма в журнал технической физики. 1996. Т. 22. № 16. С. 12-17.
4. Кисель В. П. Микродеформация молекулярных и клеточных структур – механизм влияния терапевтических и сверхмалых доз физико-химических воздействий на биологические ткани // Сб. науч. тр. «Нетрадиционные ресурсы, инновационные технологии и продукты». М.: РАЕН, 2003. Вып. 10. С. 210-216.
5. Мартусевич А. К., Колеватых Е. П. Внутри- и межсистемные метаболические трансформации кристаллообразования биосубстратов у пациентов с Нр-ассоциированными заболеваниями // Альманах клинической медицины. 2006. Т. XIV. С. 54-58.
6. Мартусевич А. К., Колеватых Е. П., Камакин Н. Ф. Диагностическая и патогенетическая ценность изучения морфологии биосубстратов при хеликобактериозе // Клиническая лабораторная диагностика. 2006. № 9. С. 54-55.
7. Мартусевич А. К., Колеватых Е. П., Кошкин А. Н. Тезиокристаллоскопическая диагностика язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки в зависимости от степени контаминированности слизистой *Helicobacter pylori* // Terra medica nova. Лабораторная диагностика. 2004. № 3. С. 13-15.

8. Мартусевич А. К., Зимин Ю. В. Биохимическое обоснование феномена микроорганизм-ассоциированного кристаллогенеза // II-я Регион. конф. «Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем (Крестовские чтения)»: Тез. докл. Иваново, 2007. С. 90.
9. Мартусевич А. К., Жданова О. Б., Успенский А. В., Написанова Л. А., Вирбалене Р. Классическая кристаллоскопия в диагностике трихинеллеза мышей // Науч. конф. «Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями»: Матер. докл. Москва, 2006. С. 233-235.
10. Мартусевич А. К., Жданова О. Б., Янченко В. А. Патогенетическое значение изучения кристаллообразования биологических жидкостей при альвеококкозе // Анналы хирургической гепатологии. 2006. Т. 11. № 3. С. 50-51.
11. Жданова О.Б., Мартусевич А.К., Распутин П.Г. Кристаллогенез биосред животных // 4-ая Межд. научн. конф. «Современные вопросы ветеринарной гомеопатии»: Матер. докл. М, 2006. С. 30-31.
12. Жданова О.Б. Паразитозы плотоядных патогенез и диагностика. Автореф. ... дисс. докт. биол. наук. Москва, 2007. 43 с.
13. Каркищенко Н. Н. Основы биомоделирования. М.: Изд-во ВПК, 2004. 608 с.
14. Namsaraev E., Baitin D., Bakhlanova I. et al. Biochemical basis of hyper-recombination activity of *Pseudomonas aeruginosa* RecA protein in *Escherichia coli* cells // *Mol. Microbiol.* 1998. V. 27, № 4. P. 727-738.
15. Lanzov V. A. Hyper-recombination in *Escherichia coli* with and without SOS response. // In: Recent research development in DNA repair and mutagenesis / Eds. M. Ruiz-Rubio, E. Flexandre-Duran, T. Roldan-Arjona. Kerala: Research Signpost, 2002. P. 24-38.
16. Рапис Е. Г. Белок и жизнь. Самоорганизация, самосборка и симметрия наноструктурных супрамолекулярных плёнок белка. М.: МИЛТА – ПКП ГИТ, 2003. 368 с.
17. Романов Ю. А. Теория биологических систем и проблема их временной организации // Проблемы хронобиологии. 1992. № 3-4. С. 105-123.
18. Дятлова К. Д. Микробные препараты в растениеводстве // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 5. С. 17-22.
19. Громов Б. В., Павленко Г. В. Экология бактерий: Учебное пособие. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 248 с.
20. *Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications* / Eds. Edelstein A. S., Kamarata R. C. Bristol: Institute of Physics. 1996. 596 p.
21. Корого А. А. Введение в биоминералогия. СПб.: Недра, 1992. 280 с.
22. Klaus T., Joerger R., Olsson E. et al. Silver-based crystalline nanoparticles, microbially fabricated // *PNAS*. 1999. № 2
23. Юшкин Н. П., Гаврилюк М. В., Голубев Е. А. Синтез, взаимодействие и коэволюция живого и минерального миров: абиогенные и углеводородные кристаллы как модели протобиологических систем. Концепция кристаллизации жизни // Информ. бюллетень РФФИ. 1996. Т. 4. С. 393.
24. Мартусевич А. К., Жданова О. Б., Колеватых Е. П. К вопросу о микроорганизм-иницированной кристаллизации // Международная молодежная конф. «Экология-2007»: Матер. докл. Архангельск, 2007. С. 312-314.
25. Мартусевич А. К., Зимин Ю. В. Биохимическое обоснование феномена микроорганизм-ассоциированного кристаллогенеза // II-ая Региональная конференция молодых ученых «Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем (Крестовские чтения)»: Тез. докл. Иваново, 2007. С. 90.
26. Мартусевич А. К. Кибернетические подходы к интерпретации результатов кристаллогенеза биологических жидкостей организма человека и животных: возможности практического использования двоичного кодирования и многоплоскостного моделирования // Вестник РГМУ. 2006. № 2. С. 398-399.