

ПРИРОДА

3 14



В НОМЕРЕ:**3 Кочиев Д.Г., Щербаков И.А.****Лазеры вместо скальпеля**

Лазеры способны максимальным образом концентрировать энергию излучения в пространстве, времени и спектральном диапазоне. Это требуется для многих практических задач; в медицине применение лазеров стало уже привычным. Меняя параметры лазерного излучения, можно инициировать развитие в биологических тканях различных процессов.

12 Куранова И.П., Ковальчук М.В.**Кристаллы для изучения белковых структур**

Сегодня белковая кристаллография—одно из активно развивающихся научных направлений. Знание пространственных структур белковых молекул широко используется для рационального поиска новых эффективных лекарственных средств, а также способствуют изучению сложных белковых ансамблей и мембранных белков.

22 Немировская И.А.**Загрязнение морских акваторий при добыче нефти**

Вопреки распространенному мнению, аварийные разливы — не главный источник нефтяного загрязнения Мирового океана. Наибольшие потери углеводородов связаны с их морской транспортировкой из районов добычи.

28 Свистов П.Ф., Полищук А.И.**Атмосферные осадки над городами и регионами России**

Химический состав дождя и снега регулярно исследуется в специализированных лабораториях. Установлено, что над городами и промышленными центрами нашей страны естественные чистые осадки не выпадают уже давно. Они содержат невероятное количество химических элементов, многие из которых опасны для всего живого.

37 Кушников В.В.**Прионы и амилоиды: ключевые свойства и роль в природе**

Некоторые белки млекопитающих (в том числе и человека) иногда полимеризуются и накапливаются в виде агрегатов (амилоидов), что приводит к неизлечимым заболеваниям — амилоидозам. В большинстве случаев они неинфекционны, исключение составляют лишь прионные болезни, связанные с превращением нормального белка PrP в его патогенную форму PrP^{Sc}. Удобной моделью для изучения этого явления стали дрожжи, у которых тоже были обнаружены прионы, правда не причиняющие им вреда.

44 Волинский А.Л.**Как смешать полимеры?**

Полимеры очень неохотно смешиваются друг с другом из-за особенностей своего молекулярного строения. Но ученые научились преодолевать эти трудности, благодаря чему сегодня производится огромное число полимерных смесей — материалов с самыми различными свойствами.

53 Завалко И.М., Ковальзон В.М.**Как возникла наука о сне****61 Костицын В.И.****Судьба первых советских геофизиков****Красная книга****71 Сухотин А.А., Бергер В.Я., Наумов А.Д.****Редкая встреча моржа в Белом море****Заметки и наблюдения****74 Матвиенко Е.Н., Поваренных М.Ю.****Пещера Прометея в Западной Грузии****Научные сообщения****84 Комаров В.Н.****Многоликие кремни****Рецензии****88 Михайлов К.Е.****Лучше меньше да лучше!**

Какие фотоальбомы о природе хотелось бы видеть?

(на кн.: В.Г.Малеев. Птицы России)

CONTENTS:

- 3 Kochiev D.G., Shcherbakov I.A.**
Lasers instead of Scalpel
Lasers can concentrate radiative energy in space, time and spectral interval with ultimate efficiency. This property is needed in many practical applications and became usual in medicine. Modification of parameters of laser radiation can initiate development of different processes in biological tissues.
- 12 Kuranova I.P., Kovalchuk M.V.**
Crystals for Study of Protein Structures
Today protein crystallography is one of the rapidly developing research fields. Knowledge of spatial structures of protein molecules is widely used for rational search of new effective drugs and also contributes to the study of complex protein ensembles and membrane proteins.
- 22 Nemirovskaya I.A.**
Marine Pollution from Oil Extraction
Contrary to common opinion, emergency spills are not the main source of oil pollution of world ocean. The most significant losses of carbohydrates occur during their sea transport from extraction sites.
- 28 Svistov P.F., Polishchuk A.I.**
Atmospheric Precipitations over Russian Cities and Regions
Chemical composition of rain and snow is analyzed in special laboratories on regular basis. It was found that over cities and industrial centers of our country the natural pure precipitation ceased to occur long ago. The current precipitation contains amazing number of chemical elements, many of them being dangerous for everything alive.
- 37 Kushnirov V.V.**
Prions and Amyloids: Key Properties and the Role in Nature
Some proteins of mammals (including humans) sometimes get polymerized and accumulate in the form of aggregates (amyloids), which leads to incurable diseases called amyloidoses. In most cases they are not infectious, except for prionic diseases associated with conversion of a normal protein PrP into its pathogenic form PrP^{Sc}. A convenient model for study of this phenomenon are yeasts in which prions were also found, while not harmful for them.
- 44 Volynsky A.L.**
How to Mix Polymers?
Polymers are very difficult to mix due to special features of their molecular structure. But scientists learned to overcome these difficulties, so a huge number of polymeric mixtures is produced today – materials with very different properties.
- 53 Zavalko I.M., Kovalzon V.M.**
How the Science of Sleep Emerged
- 61 Kostitzin V.I.**
The Fate of the First Soviet Geophysicists
- 71 Sukhotin A.A., Berger V.Ya., Naumov A.D.**
A Rare Encounter of Walrus in White Sea
Red Book
- 74 Matvienko E.N., Povarennykh M.Yu.**
The Cave of Prometheus in Western Georgia
Notes and Observations
- 84 Komarov V.N.**
Multifaceted Flints
Scientific Communications
- 88 Mikhailov K.E.**
Better Less But Better!
What Photo Albums on Nature we Want to See?
(on book: V.G.Maleev. Birds of Russia)
Book Reviews

Лазеры вместо скальпеля

Д.Г.Кочиев, И.А.Щербаков

Уникальная способность лазера максимально концентрировать энергию в пространстве, во времени и в спектральном диапазоне делают этот прибор незаменимым средством во многих областях человеческой деятельности, и в частности в медицине [1, 2]. При лечении заболеваний происходит вмешательство в патологический процесс или болезненное состояние, что самым радикальным образом практикует хирургия. Благодаря прогрессу в науке и технологиях на смену механическим хирургическим инструментам приходят принципиально иные, в том числе лазерные.

Излучение и ткани

Если в качестве инструмента используется лазерное излучение, то его задача — вызвать изменения в биологической ткани (например, выполнить резекцию при операции, запускать химические реакции при фотодинамической терапии). Параметры лазерного излучения (длина волны, интенсивность, длительность воздействия) могут изменяться в широких пределах, что при взаимодействии с биологическими тканями дает возможность инициировать развитие различных процессов: фотохимических изменений, термической и фотодеструкции, лазерной абляции, оптического пробоя, генерации ударных волн и др.

На рис.1 приведены длины волн лазеров, нашедших в той



Давид Георгиевич Кочиев, кандидат физико-математических наук, заместитель директора Института общей физики им.А.М.Прохорова РАН по научной работе. Область научных интересов — лазерная физика, лазеры для хирургии.



Иван Александрович Щербаков, академик, академик-секретарь Отделения физических наук РАН, профессор, доктор физико-математических наук, директор Института общей физики РАН, заведующий кафедрой лазерной физики Московского физико-технического института. Награжден золотой медалью им.А.М.Прохорова РАН (2013). Занимается лазерной физикой, спектроскопией, нелинейной и квантовой оптикой, медицинскими лазерами.

или иной степени применение в медицинской практике. Их спектральный диапазон простирается от ультрафиолетовой (УФ) до средней инфракрасной (ИК) области, а интервал плотностей энергии охватывает 3 порядка ($1 \text{ Дж/см}^2 - 10^3 \text{ Дж/см}^2$), интервал плотностей мощности — 18 порядков ($10^{-3} \text{ Вт/см}^2 - 10^{15} \text{ Вт/см}^2$), временной диапазон — 16 порядков, от непрерывного излучения ($\sim 10 \text{ с}$) до фемтосекундных импульсов (10^{-15} с). Процессы взаимодействия лазерного излучения с тканями определяются пространственным распределением объемной плотности энергии и зависят от интенсивности и длины волны падающего излучения, а также от оптических свойств ткани.

На первых стадиях развития лазерной медицины биоткань представлялась как вода с «примесями», поскольку человек на 70—80% состоит из воды и полагалось, что механизм воздействия лазерного излучения на биоткани определяется ее поглощением. При применении непрерывных лазеров такая концепция была более или менее работоспособна. Если необходимо организовать воздействие на поверхность биоткани, следует выбрать длину волны излучения,

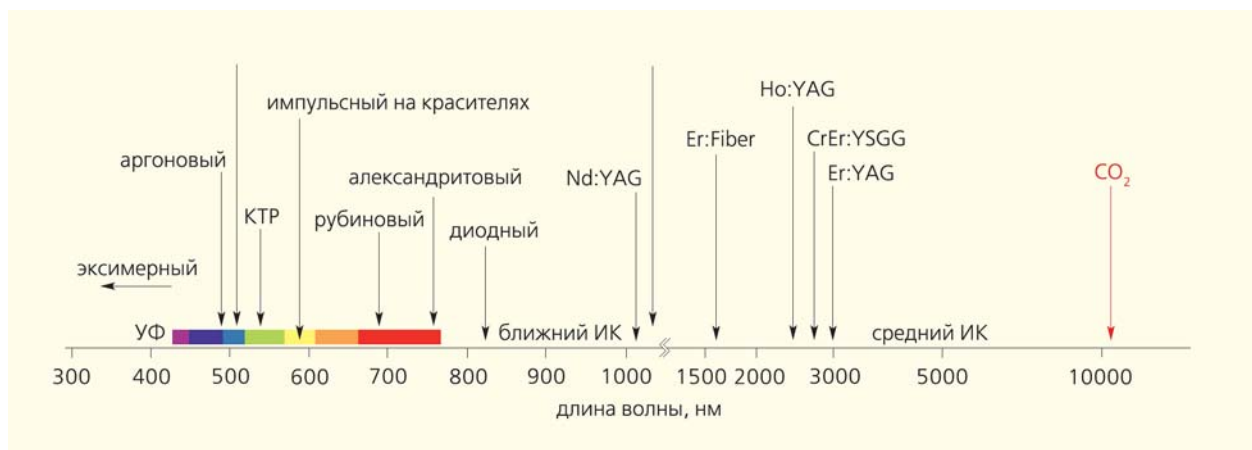


Рис.1. Типы лазеров, применяющихся в медицинской практике, и длины волн их излучения.

сильно поглощаемого водой. Если требуется объемный эффект, наоборот, излучение должно слабо ею поглощаться. Однако, как выяснилось в дальнейшем, другие компоненты биоткани тоже способны поглощать (в частности, в видимой области спектра — составляющие крови, рис.2). Пришло понимание, что биоткань — это не вода с примесями, а гораздо более сложный объект.

В то же время начали применяться импульсные лазеры. Воздействие на биоткани при этом определяется комбинацией длины волны, плотности энергии и длительности импульса излучения. Последний фактор, например, помогает разделить термическое и нетермическое воздействие.

В практику вошли импульсные лазеры с большим диапазоном изменения длительности им-

пульса — от милли- до фемтосекунд. Здесь вступают в игру различного рода нелинейные процессы: оптический пробой на поверхности мишени, многофотонное поглощение, образование и развитие плазмы, генерация и распространение ударных волн. Стало очевидным, что невозможно создать единый алгоритм поиска нужного лазера и в каждом конкретном случае требуется свой подход. С одной стороны, это крайне осложнило задачу, с другой — открыло совершенно фантастические возможности варьировать способы воздействия на биологическую ткань.

При взаимодействии излучения с биотканями большое значение имеет рассеяние. На рис.3 приведены два конкретных примера распределения интенсивности излучения в тканях предстательной железы собаки при падении на ее поверхность лазерного излучения с разными длинами волн: 2.09 и 1.064 мкм. В первом случае поглощение превалирует над рассеянием, во втором ситуации обратная (табл.1).

В случае сильного поглощения проникновение излучения подчиняется закону Бугера—Ламберта—Бэра, т.е. имеет место экспоненциальное затухание. В видимом и ближнем ИК-диапазонах длин волн типичные значения коэффициентов рассеяния большинства биологических тканей лежат в пределах 100—500 см⁻¹ и монотонно уменьшаются с увеличением длины волны излучения. За исключением УФ- и дальней ИК-области коэффициенты рассеяния биоткани на один-два порядка величины больше коэффициента поглощения. В условиях доминирования рассеяния над поглощением достоверную картину распространения излучения можно получить, используя модель диффузного приближения, имеющую, правда, вполне четкие рамки применимости, которые не всегда принимаются во внимание.

Итак, при применении того или иного лазера для конкретных операций следует учитывать целый ряд нелинейных процессов и соотношение

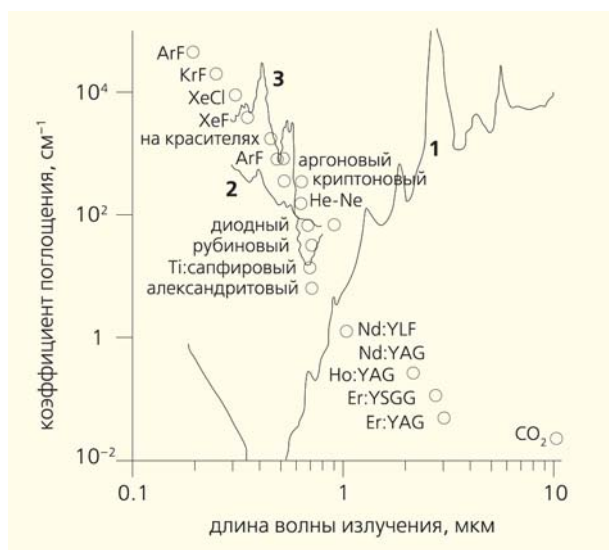


Рис.2. Зависимость поглощения от длины волны распространяющегося лазерного излучения для: воды (1), артерии (2), крови (3). Кружками показаны длины волн различных лазеров, применяемых в медицине.

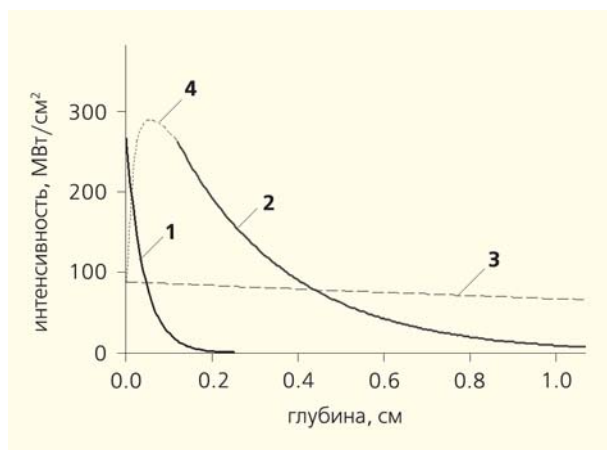


Рис.3. Рассчитанное в диффузном приближении распределение интенсивности излучения Ho:YAG-лазера с длиной волны около 2.09 мкм (1) и Nd:YAG-лазера с длиной 1.064 мкм (2), распространяющегося в ткани предстательной железы собаки. Показаны также интенсивность излучения Nd:YAG-лазера при отсутствии рассеяния (3) и ожидаемая форма распределения интенсивности излучения в приповерхностном слое (4).

Таблица 1

Параметры лазерного излучения и оптические характеристики ткани предстательной железы собаки

Характеристики	Nd:YAG	Ho:YAG
Длина волны, мкм	1.064	2.09
Энергия, Дж	1.0	3.0
Длительность, мкс	1.0	1.0
Коэффициент поглощения μ_a , см^{-1}	0.27	26.93
Транспортный коэффициент рассеяния μ'_s , см^{-1}	17.6	—
Эффективная глубина проникновения $\delta_{\text{эф}}$, см	0.26	0.04

рассеяния и поглощения. Знание поглощающих и рассеивающих свойств выбранной ткани необходимо для расчета распределения излучения внутри биологической среды, определения оптимальной дозировки, планирования результатов воздействия.

Механизмы взаимодействия

Рассмотрим основные типы взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями, реализуемые при использовании лазеров в клинической практике.

Фотохимический механизм взаимодействия играет основную роль при фотодинамической терапии, когда в организм вводятся выбранные хромофоры (фотосенсибилизаторы). Монохроматичес-

кое излучение инициирует селективные фотохимические реакции с их участием, запускающие биологические преобразования в тканях. После резонансного возбуждения лазерным излучением молекула фотосенсибилизатора испытывает несколько синхронных или последовательных распадков, которые вызывают внутримолекулярные реакции переноса. В результате цепочки реакций высвобождается цитотоксический реагент, необратимым образом окисляющий основные клеточные структуры. Воздействие происходит при невысоких плотностях мощности излучения ($\sim 1 \text{ Вт/см}^2$) и длительных временах (от секунд до непрерывного облучения). В большинстве случаев используется лазерное излучение видимого диапазона длин волн, имеющее большую глубину проникновения, что важно, когда требуется влиять на глубоко лежащие тканевые структуры.

Если фотохимические процессы происходят за счет протекания цепочки специфических химических реакций, то термические эффекты при воздействии лазерного излучения на ткани, как правило, не специфичны. На микроскопическом уровне идут объемное поглощение излучения за счет переходов в молекулярных колебательно-вращательных зонах и последующее безызлучательное затухание. Температура ткани повышается очень эффективно, поскольку поглощению фотонов способствуют огромное количество доступных колебательных уровней большинства биомолекул и многочисленность возможных каналов релаксации при столкновениях. Типичные значения энергии фотонов равны: 0.35 эВ — для Er:YAG-лазеров*; 1.2 эВ — для Nd:YAG-лазеров; 6.4 эВ — для ArF-лазеров и значительно превышают кинетическую энергию молекулы, которая при комнатной температуре составляет лишь 0.025 эВ.

Термические эффекты в ткани играют доминирующую роль при использовании лазеров с непрерывным режимом генерации и импульсных лазеров, с длительностями импульса в несколько сот микросекунд и более (лазеры в режиме свободной генерации). Удаление ткани начинается после нагрева ее приповерхностного слоя до температуры выше 100°C и сопровождается повышением давления в мишени. Гистология на этом этапе показывает наличие разрывов и образование вакуолей (полостей) внутри объема. Продолжающееся облучение приводит к росту температуры до значений $350\text{--}450^\circ\text{C}$, происходит выгорание и карбонизация биоматериала. Тонкий слой карбонизированной ткани ($\approx 20 \text{ мкм}$) и слой вакуолей ($\approx 30 \text{ мкм}$) поддерживают высокий градиент давления вдоль фронта удаления ткани, скорость которого постоянна во времени и зависит от типа ткани.

* YAG — Yttrium Aluminum Garnet (иттриево-алюминиевый гранат). Химический элемент перед аббревиатурой указывает легирующую добавку.

При импульсном лазерном воздействии на развитие фазовых процессов влияет наличие внеклеточного матрикса (ВКМ). Кипение воды внутри объема ткани происходит, когда разница химических потенциалов пара и жидкой фазы, необходимая для роста пузырей, превышает не только поверхностное натяжение на границе раздела фаз, но и энергию эластичного растяжения ВКМ, необходимую для деформации матрицы окружающей ткани. Рост пузыря в ткани требует большего внутреннего давления, чем в чистой жидкости; повышение давления приводит к увеличению температуры кипения. Давление растет до тех пор, пока не превысит предел прочности ВКМ ткани при растяжении и не приведет к удалению и выбросу ткани. Термическое повреждение ткани может меняться от карбонизации и плавления на поверхности до гипертермии на глубину в несколько миллиметров в зависимости от плотности мощности и времени воздействия падающего излучения.

Пространственно ограниченный хирургический эффект (селективный фототермолиз) осуществляется при длительности импульса, меньшей характерного времени тепловой диффузии нагреваемого объема, — тогда тепло удерживается в области воздействия (не перемещается даже на расстояние, равное оптической глубине проникновения), и термическое повреждение окружающих тканей мало. Воздействие излучения непрерывных лазеров и лазеров с длинными импульсами (длительностью ≥ 100 мкс) сопровождается большей зоной термического поражения близлежащих к области воздействия тканей.

Сокращение длительности импульса меняет картину и динамику термических процессов при взаимодействии лазерного излучения с биотканями. При ускорении подвода энергии в биоматериал ее пространственное распределение сопровождается значительными термическими и механическими переходными процессами. Поглощая энергию фотонов и нагреваясь, материал расширяется, стремясь перейти в состояние равновесия в соответствии с его термодинамическими свойствами и с внешними условиями среды. Результирующая неоднородность распределения температуры порождает термоупругие деформации и распространяющуюся в материале волну сжатия.

Однако расширение или установление механического равновесия в ответ на нагрев ткани занимает характерное время, равное по порядку величины времени, необходимому продольной акустической волне для прохождения по системе. Когда длительность лазерного импульса его превышает, материал расширяется в течение действия импульса, и значение индуцированного давления меняется вместе с интенсивностью лазерного излучения. В обратном случае энерговыход в систему происходит быстрее, чем та успевает механически на него реагировать, и скорость расширения определяется инерцией нагретого слоя

ткани независимо от интенсивности излучения, а давление меняется вместе со значением объемной энергии, поглощенной в ткани. Если взять совсем короткий импульс (с длительностью, много меньшей времени пробега акустической волны по области тепловыделения), ткань будет «инерциально удерживаться», т.е. не получит времени на расширение, и нагрев произойдет при постоянном объеме.

Когда скорость выделения энергии в объеме ткани при поглощении лазерного излучения намного выше скорости убыли энергии на испарение и нормальное кипение, вода, находящаяся в ткани, переходит в перегретое метастабильное состояние. При подходе к спинодали* вступает в действие флуктуационный механизм возникновения зародышей (гомогенная нуклеация), что обеспечивает быстрый распад метастабильной фазы. Наиболее ярко процесс гомогенной нуклеации проявляется при импульсном нагреве жидкой фазы, что выражается во взрывном вскипании перегретой жидкости (фазовый взрыв).

Лазерное излучение способно и напрямую разрушать биоматериал. Энергия диссоциации химических связей органических молекул меньше энергии фотонов лазерного излучения УФ-диапазона (4.0—6.4 эВ) или сравнима с ней. При облучении ткани такие фотоны, поглощаясь сложными органическими молекулами, могут вызывать прямой разрыв химических связей, осуществляя «фотохимический распад» материала. Механизм взаимодействия в диапазоне длительностей лазерного импульса 10 пс — 10 нс может быть классифицирован как электромеханический, что подразумевает генерацию плазмы в интенсивном электрическом поле (оптический пробой) и удаление тканей за счет распространения ударных волн, кавитации и формирования струй.

Образование плазмы на поверхности ткани характерно для коротких длительностей импульса при интенсивностях излучения порядка 10^{10} — 10^{12} Вт/см², соответствующих напряженности локального электрического поля $\sim 10^6$ — 10^7 В/см. В материалах, испытывающих повышение температуры благодаря высокому значению коэффициента поглощения, плазма может возникать и поддерживаться за счет термоэмиссии свободных электронов. В средах с малым поглощением она образуется при больших интенсивностях излучения за счет освобождения электронов при многофотонном поглощении излучения и лавинообразной ионизации молекул ткани (оптический пробой). Оптический пробой позволяет «закачивать» энергию не только в хорошо поглощающие пигментированные, но и в прозрачные, слабо поглощающие ткани.

* Спинодаль — линия на диаграмме состояния, соответствующая температуре, ниже которой происходит распад твердого раствора.

Удаление тканей при воздействии импульсным лазерным излучением требует деструкции ВКМ и не может рассматриваться просто как процесс дегидратации при нагреве. К разрушениям ВКМ ткани приводят давления, генерируемые при фазовом взрыве и ограниченном кипении. В результате наблюдается взрывной выброс материала без полного испарения. Энергетический порог такого процесса оказывается ниже удельной энтальпии парообразования воды. Ткани, имеющие высокую прочность на разрыв, требуют более высоких температур для разрушения ВКМ (пороговая объемная плотность энергии должна быть сравнима с энтальпией парообразования).

Инструменты на выбор

Один из самых распространенных хирургических лазеров — Nd:YAG-лазер, используемый при вмешательствах с эндоскопическим доступом в пульмонологии, гастроэнтерологии, урологии, в эстетической косметологии при удалении волос, при интерстициальной лазерной коагуляции опухолей в онкологии. В режиме модулированной добротности, с длительностями импульса от 10 нс, он применяется в офтальмологии, например при лечении глаукомы.

Большинство тканей на его длине волны (1064 нм) имеют низкий коэффициент поглощения. Эффективная глубина проникновения такого излучения в ткани может составлять несколько миллиметров и обеспечивает хорошие гемостаз и коагуляцию. Однако объем удаленного материала относительно невелик, а рассечение и абляция* тканей может сопровождаться термическим повреждением близлежащих областей, отеками и воспалительными процессами.

Важное преимущество Nd:YAG-лазера — возможность доставки излучения в зону воздействия волоконно-оптическими световодами. Использование эндоскопического и волоконного инструмента позволяют проводить лазерное излучение в нижний и верхний отделы желудочно-кишечного тракта практически неинвазивным способом. Увеличение длительности импульса этого лазера в режиме модулированной добротности до 200—800 нс позволило использовать тонкие оптические волокна с диаметром сердцевины 200—400 мкм для фрагментации камней. К сожалению, поглощение в оптическом волокне не позволяет доставлять лазерное излучение с длинами волн, более эффективными для абляции тканей, такими как 2.79 мкм (Er:YSGG*) и 2.94 мкм (Er:YAG). Для транспортировки излучения с длиной волны 2.94 мкм в Институте общей физики (ИОФ) им.А.М.Прохорова РАН была

* Лазерная абляция — метод удаления вещества с поверхности лазерным импульсом (вещество испаряется в виде свободных молекул, атомов и ионов).

разработана оригинальная технология роста кристаллических волокон, с помощью которой было изготовлено уникальное кристаллическое волокно из лейкосапфира, прошедшее успешные испытания. Транспортировка излучения по коммерчески доступным световодам возможна для излучения с меньшими длинами волн: 2.01 мкм (Cr:Tm:YAG) и 2.12 мкм (Cr:Tm:Ho:YAG) [3]. Глубина проникновения излучения этих длин волн достаточно мала для эффективной абляции и минимизации сопутствующих термических эффектов (она составляет ~170 мкм для тулиевого лазера и ~350 мкм для гольмиевого).

Дерматология взяла на вооружение лазеры как видимого (рубиновые, alexandritовые, лазеры с генерацией второй гармоники нелинейными кристаллами титанил-фосфата калия, KTP), так и инфракрасного диапазона длин волн (Nd:YAG). Селективный фототермолиз — основной эффект, используемый при лазерном воздействии на ткани кожи; показания для лечения — различные сосудистые поражения кожи, доброкачественные и злокачественные опухоли, пигментация, удаление татуировок и косметические вмешательства.

Лазеры на Er:Cr:YSGG (2780 нм) и Er:YAG (2940 нм) применяются в стоматологии для воздействия на твердые ткани зубов при лечении кариеса и подготовке полости зуба; при манипуляциях отсутствуют термические эффекты, повреждения структуры зуба и дискомфорт у пациента. KTP-, Nd:YAG-, Er:Cr:YSGG- и Er:YAG-лазеры задействованы в хирургии на мягких тканях ротовой полости.

Исторически первая область медицины, которая освоила новый инструмент, — офтальмология. Работы, связанные с привариванием сетчатки лазером, начались еще в конце 1960-х. Понятие «лазерная офтальмология» стало общеупотребительным, современную клинику этого профиля невозможно представить без применения лазеров. Приваривание сетчатки световым излучением обсуждалось многие годы, однако лишь с появлением лазерных источников фотокоагуляция сетчатки вошло в широкую повседневную клиническую практику.

В конце 70-х — начале 80-х годов прошлого столетия развернулись работы с лазерами на основе импульсного Nd:YAG-лазера для разрушения капсулы хрусталика в случае вторичной катаракты. Сегодня капсулотомия, выполняемая с помощью неодимового лазера с модулированной добротностью, — стандартная хирургическая манипуляция при лечении этого заболевания. Революцию в офтальмологии совершило открытие возможности изменять с помощью коротковолнового УФ-излучения кривизну роговицы и таким образом корректировать остроту зрения. Лазерные

* YSGG — Yttrium Scandium Gallium Garnet (иттрий-скандий-галлиевый гранат).

Физика — медицине

операции по коррекции зрения теперь широко распространены и выполняются во многих клиниках. Существенный прогресс в рефракционной хирургии и в ряде других малоинвазивных микрохирургических вмешательств (при пересадке роговицы, создании внутривитреальных каналов, лечении кератоконуса и др.) был достигнут при внедрении лазеров с короткой и сверхкороткой длительностью импульсов.

В настоящее время в офтальмологической практике наиболее популярны твердотельные Nd:YAG- и Nd:YLF*-лазеры (непрерывные, импульсные с модуляцией добротности с длительностью импульсов порядка нескольких наносекунд и фемтосекундные), в меньшей степени — Nd:YAG-лазеры с длиной волны 1440 нм в режиме свободной генерации, Ho- и Er-лазеры.

Поскольку различные участки глаза имеют разный состав и разный коэффициент поглощения для одной и той же длины волны, выбор последней определяет как отрезок глаза, на котором будет происходить взаимодействие, так и локальный эффект в зоне фокусировки. Исходя из спектральных характеристик пропускания глаза, для хирургического воздействия на внешние слои роговицы и переднего отрезка целесообразно использовать лазеры с длиной волны в диапазоне 180—315 нм. Более глубокое проникновение, вплоть до хрусталика, возможно осуществить в спектральном диапазоне 315—400 нм, а для всех дальних областей подходит излучение с длиной волны более 400 нм и вплоть до 1400 нм, когда начинается существенное поглощение воды.

* YLF — Yttrium Lithium Fluoride (фторид иттрия-лития).

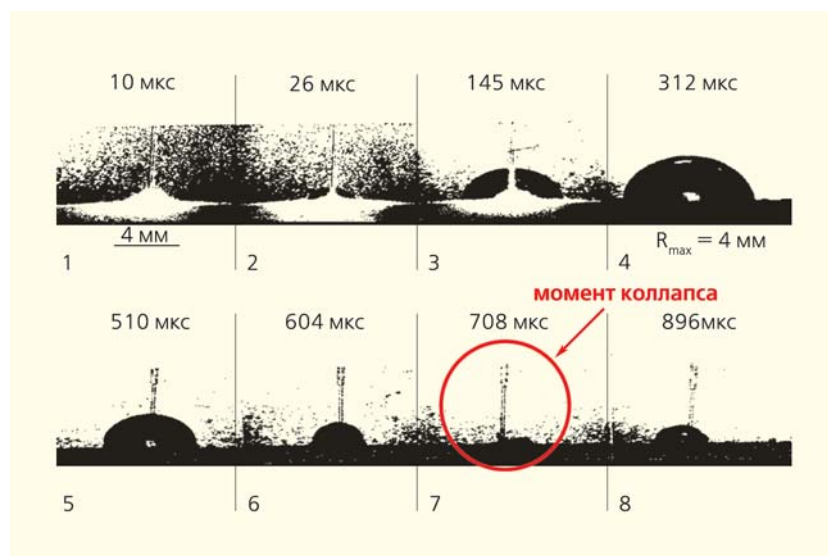


Рис.4. Динамика развития кавитационного пузыря: 1— плазма спустя 10 мкс после падения излучения на поверхность камня; 2—4 — рост кавитационного пузыря до максимального радиуса $R = 4$ мм через 312 мкс; 5—7 — процесс схлопывания пузыря; 7 — момент коллапса кавитационного пузыря спустя 708 мкс [6].

На основе учета свойств биологических тканей и типа реализуемого взаимодействия при падении излучения Институт общей физики разрабатывает лазерные системы для применения в различных областях хирургии, сотрудничая со многими организациями. В число последних входят академические институты (Институт проблем лазерных и информационных технологий — ИПЛИТ, Институт спектроскопии, Институт аналитического приборостроения), Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова, ведущие медицинские центры страны (МНТК «Микрохирургия глаза» им.С.Н.Федорова, Московский научно-исследовательский онкологический институт им.П.А.Герцена Росздрава, Российская медицинская академия последиplomного образования, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им.А.Н.Бакулева РАМН, ЦКБ №1 ОАО РЖД), а также ряд коммерческих компаний («Оптосистемы», «Визионика», «Новые энергетические технологии», «Лазерные технологии в медицине», «Класстер», НТЦ «Волоконные оптические системы»).

Так, в нашем институте создан лазерный хирургический комплекс «Лазурит», который может выступать в качестве как скальпеля-коагулятора, так и литотриптора, т.е. прибора для разрушения камней в органах человека. Причем литотриптор работает на новом оригинальном принципе — используется излучение с двумя длинами волн. Это лазер на базе кристалла Nd:YAlO₃ (с основной длиной волны излучения 1079.6 нм и его второй гармоникой в зеленой области спектра). Установка снабжена блоком обработки видеoinформации и позволяет следить за операцией в режиме реального времени.

Двухволновое лазерное воздействие микросекундной длительности обеспечивает фотоакустический механизм фрагментации камней, который основан на открытом А.М.Прохоровым с сотрудниками [4] оптико-акустическом эффекте — генерации ударных волн при взаимодействии лазерного излучения с жидкостью. Воздействие оказывается нелинейным [5, 6] (рис.4) и включает в себя несколько стадий: оптический пробой на поверхности камня, образование плазменной искры, развитие кавитационного пузыря и распространение ударной волны при его коллапсе.

В итоге через ~700 мкс с момента падения лазерного излучения на поверхность камня происходит разрушение последнего

Таблица 2

Химический состав камней и параметры лазерного излучения при фрагментации в экспериментах *in vitro*

Тип камня	Частота, Гц	Энергия, мДж	Длительность, с	Количество импульсов
Натрия урат моногидрат	10	90	16.2	162
Вевиллит (кальция оксалат моногидрат)	9	100	46.8	421
Цистин	9	123	76.4	687

благодаря воздействию ударной волны, генерируемой при коллапсе кавитационного пузыря. Преимущества такого метода литотрипсии очевидны: во-первых, обеспечивается безопасность воздействия на окружающие камень мягкие ткани, так как ударная волна в них не поглощается и, следовательно, не наносит им вреда, присущего другим лазерным методам литотрипсии; во-вторых, достигается высокая эффективность при фрагментации камней любой локализации и химического состава (табл.2); в-третьих, гарантируется высокая скорость фрагментации (см. табл.2: продолжительность разрушения камней варьируется в диапазоне 10—70 с в зависимости от их химического состава); в-четвертых, при доставке излучения не повреждается волоконный инструмент (за счет оптимально выбранной длительности импульса); наконец, радикально снижается число осложнений и сокращается послеоперационный период лечения.

Комплекс «Лазурит» (рис.5) включает в себя также скальпель-коагулятор, который позволяет, в частности, успешно проводить уникальные операции на кровенаполненных органах, таких как почка, удалять опухоли с минимальной кровопотерей, без пережатия почечных сосудов и без создания искусственной ишемии органа, сопутствующей принятым сейчас способам хирургического вмешательства. Резекция проводится при лапароскопическом доступе. При эффективной глубине проникновения импульсно-одномикронного излучения ~1 мм одновременно осуществляются резекция опухоли, коагуляция и гемостаз, а также достигается абластичность раны. Разработана новая медицинская технология лапароскопической резекции почки при раке $T_1N_0M_0$.

Результатами исследовательских работ в области офтальмологии стали разработки офтальмологических лазерных систем «Микроскан» и ее модификации «Микроскан Визум» для рефракционной хирургии на основе ArF-эксимерного лазера (193 нм). С помощью этих установок осуществляется коррекция близорукости, дальнозоркости и астигматизма. Реализован так называемый метод «летающего пятна»: роговица глаза засвечивается пятном излучения диаметром порядка 0.7 мм, которое сканирует ее поверхность по алгоритму, заданному компьютером, и изменяет ее форму. Коррекция зрения на одну диоптрию при частоте повторения импульсов 300 Гц обеспечивается за 5 с. Воздействие остается поверхностным, так как излучение с этой длиной волны сильно поглощается роговицей глаза. Система слежения за глазом позволяет обеспечить высокое качество операции независимо от подвижности глаза пациента. Установка «Микроскан» сертифицирована в России, странах СНГ, Европе и Китае, ею оснащены 45 российских клиник. Офтальмологические эксимерные системы для рефракционной хирургии, разработанные в нашем институте, в настоящее время занимают 55% отечественного рынка.

При поддержке Федерального агентства по науке и инновациям при участии ИОФ РАН, ИПЛИТ РАН и МГУ создан офтальмологический комплекс, включающий в себя «Микроскан Визум», диагностическую аппаратуру, состоящую из аберрометра и сканирующего офтальмоскопа, а также уникальную фемтосекундную лазерную офтальмологическую систему «Фемто Визум». Рождение этого комплекса стало примером плодотворного сотрудничества академических организаций с Мос-



Рис.5. Лазерный хирургический комплекс «Лазурит».

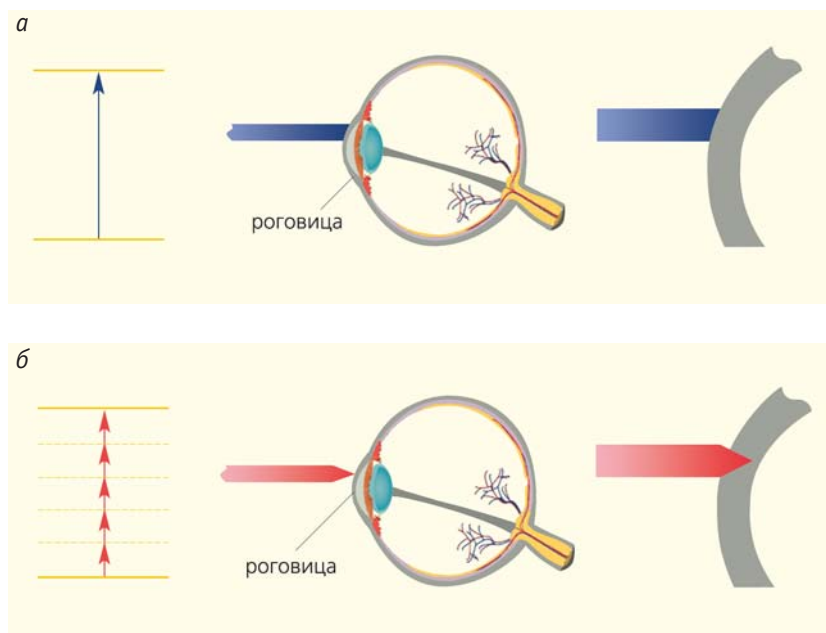


Рис.6. Процессы однофотонного и многофотонного поглощения тканью роговицы глаза лазерного излучения: системы «Микроскан» с длиной волны 193 нм и энергией фотона 6.4 эВ (а) и системы «Фемто Визум» с длиной волны 1.064 мкм, длительностью импульса 250—400 фс и энергией фотона 1.2 эВ (б).

ковским государственным университетом в рамках единой программы: в ИОФ был разработан хирургический инструмент, а в МГУ и ИПЛИТе — диагностическая аппаратура, что позволяет проводить целый ряд уникальных офтальмологических операций. На принципе работы фемтосекундной офтальмологической установки следует остановиться подробнее. За ее основу был выбран неодимовый лазер с длиной волны излучения 1064 нм. Если в случае применения эксимерного лазера роговица сильно поглощает, то при длине волны ~1 мкм линейное поглощение слабое. Однако за счет малой длительности импульса (400 фс) при фокусировке излучения удается достичь высокой плотности мощности, и, следовательно, становятся эффективными многофотонные процессы. При организации соответствующей фокусировки оказывается возможным так воздействовать на роговицу, что ее поверхность никак не затрагивается, а многофотонное поглощение осуществляется в объеме. В качестве механизма воздействия выступает фотодеструкция тканей роговицы при многофотонном поглощении (рис.6), когда отсутствует термическое повреждение близлежащих слоев ткани и возможно осуществление вмешательства с прецизионной точностью. Если для излучения эксимерного лазера энергия фотона (6.4 эВ) сравнима с энергией диссоциации, то в случае одномикронного излучения (1.2 эВ) она по крайней мере вдвое, а то и в семь раз меньше, что и обеспечивает описанный эффект и открывает новые возможности в лазерной офтальмологии.

Интенсивно развиваются сегодня фотодинамическая диагностика и терапия рака на основе использования лазера, монохроматическое излучение которого возбуждает флуоресценцию красителя-фотосенсибилизатора и инициирует селективные фотохимические реакции, вызывающие биологические преобразования в тканях. Дозы введения красителя составляют 0.2—2 мг/кг. При этом фотосенсибилизатор преимущественно накапливается в опухоли, и его флуоресценция позволяет установить локализацию опухоли. За счет эффекта переноса энергии и увеличения мощности лазера происходит образование синглетного кислорода, являющегося сильным окислителем, что приводит к разрушению опухоли. Таким образом, по описанной методике осуществляется не только диагностика, но и лечение онкологических заболеваний. Следует заметить,

что введение фотосенсибилизатора в организм человека — не вполне безобидная процедура и поэтому в ряде случаев лучше применять так называемую лазероиндуцированную аутофлуоресценцию. Оказалось, в некоторых случаях, в особенности с использованием коротковолнового лазерного излучения, здоровые клетки не флуоресцируют, тогда как раковые клетки обнаруживают эффект флуоресценции. Эта методика предпочтительнее, однако она пока служит в основном диагностическим целям (хотя в последнее время предпринимаются шаги и для реализации терапевтического эффекта). В нашем институте разработаны серии приборов как для флуоресцентной диагностики, так и для фотодинамической терапии. Это оборудование сертифицировано и выпускается серийно, им оснащены 15 московских клиник.

Для эндоскопических и лапароскопических операций необходимый компонент лазерной установки составляют средства доставки излучения и формирования его поля в области взаимодействия. У нас сконструированы такие устройства на основе многомодовых оптических волокон, позволяющие работать в спектральной области от 0.2 до 16 мкм.

При поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в ИОФ развивается методика поиска распределения наночастиц по размерам в жидкости (и в частности, в крови человека) с помощью спектроскопии квазиупругого рассеяния света. Было обнаружено, что присутствие в жидко-

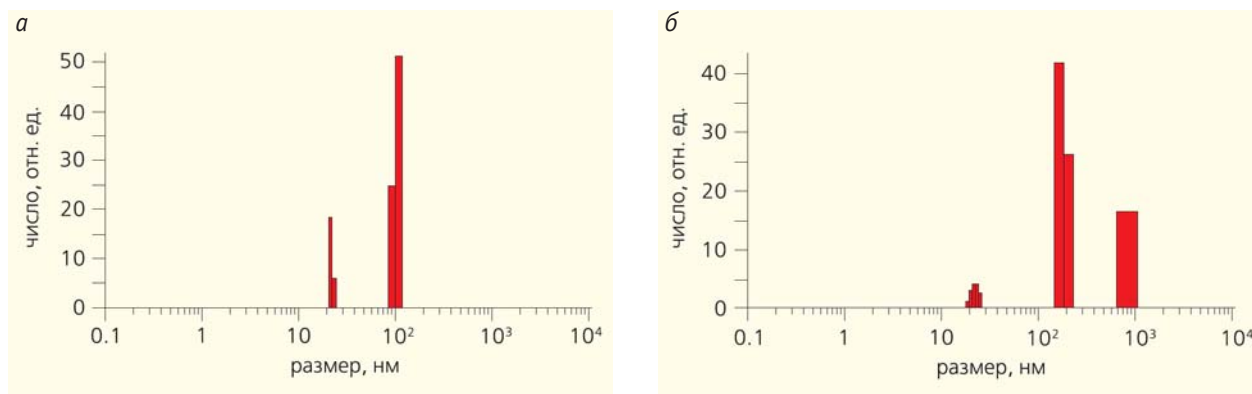


Рис.7. Спектр размеров молекулярных комплексов сыворотки крови здорового пациента (а) и пациента с сердечно-сосудистыми нарушениями (б).

сти наночастиц приводит к уширению центрального пика рэлеевского рассеяния, и измерение величины этого уширения позволяет определять размеры наночастиц. Исследование спектров размеров наночастиц в сыворотке крови пациентов с сердечно-сосудистыми нарушениями показали присутствие белково-липидных кластеров больших размеров (рис.7). Было также установлено, что частицы больших размеров характерны и для крови онкологических больных. Более того, при положительном результате лечения пик, ответственный за частицы больших размеров, исчезал, но в случае рецидива снова появлялся. Таким образом, предлагаемая методика весьма полезна для диагностики как онкологических, так и сердечно-сосудистых заболеваний.

Ранее в институте был разработан новый метод обнаружения предельно низких концентраций органических соединений. Основными составляющими прибора служили лазер, времяпролетный масс-спектрометр и наноструктурирован-

ная пластина, на которой адсорбировался исследуемый газ. Сегодня эта установка модифицируется для анализа крови, что также откроет новые возможности для ранней диагностики многих заболеваний.

* * *

Решение целого ряда медицинских проблем возможно только при объединении усилий в нескольких областях: это и фундаментальные исследования по лазерной физике, и детальное изучение взаимодействия излучения с веществом, и анализ процессов переноса энергии, и медико-биологические изыскания, и разработка медицинских технологий лечения.

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что пионером применения методов лазерной физики в медицине был Александр Михайлович Прохоров, основатель Института общей физики. Многие из работ, о которых шла речь выше, были начаты по его инициативе. ■

Литература

1. Щербаков И.А. Лазерная физика в медицине // УФН. 2010. Т. 180. №:6. С. 661—665.
2. Kochiev D.G., Lukashev A.V., Vartapetov S.K., Shcherbakov I.A. Surgical solid-state lasers and their clinical applications // Handbook of solid-state lasers / Edited by B.Denker and E.Shklovsky. 2013. P.572—597.
3. Конов В. И., Осико В. В., Щербаков И.А. Фундаментальные достижения оптики и лазерной физики для медицины // Вестник РАН. 2004. Т. 74. № 2. С. 99—124.
4. Аскаръян Г. А., Прохоров А. М., Чантурия Г. Ф. и др. Луч ОКГ в жидкости // ЖЭТФ. 1963. Т.44. В.6. С.2180—2182.
5. Helfmann J., Mibailov V. A., Konov V. I. et al. Efficiency of stone fragmentation by long pulses of a Q-switched Nd:YAG laser // Proceedings SPIE. 1992. 1643. P.78.
6. Rink K., Delacretaz G., Salatbe R.P. Fragmentation process of current laser lithotriptors. // Lasers Surg. Med. 1995. V.16. P.134—146.

Кристаллы для изучения белковых структур



И.П.Куранова, М.В.Ковальчук

Огромные успехи в изучении механизмов работы биологических макромолекул и их ансамблей в значительной степени основаны на результатах рентгеноструктурного анализа (РСА) этих молекул. Этот метод дает возможность определить атомные координаты составляющих кристалл атомов и воссоздать атомную структуру молекулы посредством математических расчетов по дифракционной картине, получаемой при рассеянии рентгеновских лучей белковым кристаллом. Хотя в настоящее время для исследования пространственных структур применяются и другие методы (например, ядерного магнитного резонанса), ведущая роль рентгеноструктурного анализа сохраняется — более 80% пространственных структур, представленных в Международном банке белковых данных, установлены именно этим методом [1, 2]. В этом банке сегодня уже хранятся координаты десятков тысяч различных глобулярных белков, но для белковой инженерии, биотехнологии, медицины, фармакологии требуются данные о все новых и новых структурах.

В Институте кристаллографии изучение пространственных структур белковых молекул начал Б.К.Вайнштейн* еще

* Подобнее см.: *Вайнштейн Б.К.* Кристаллография сегодня // Природа. 1974. №3. С.44–53.



Инна Петровна Куранова, доктор химических наук, главный научный сотрудник отдела рентгеновских методов анализа и синхротронного излучения Института кристаллографии РАН (ИК РАН). Основные научные интересы связаны с кристаллизацией белков и исследованием их структуры и функции методом рентгеноструктурного анализа.



Михаил Валентинович Ковальчук, член-корреспондент РАН, директор НИЦ КИ, руководитель межведомственной рабочей группы по направлению «Приоритетные и междисциплинарные научные исследования» Совета при Президенте РФ по науке и образованию, декан физического факультета Санкт-Петербургского университета. Лауреат премий правительства РФ в области науки и техники, в области образования, премии им.Е.С.Федорова РАН.

Кавалер орденов «За заслуги перед отечеством» III и IV степеней. Область научных интересов — кристаллография и кристаллохимия, физика конденсированного состояния, нанобиоорганические материалы и системы, применение рентгеновского, синхротронного излучения и нейтронов в материаловедении.

в 1959 г. В созданной им лаборатории выращиванием пригодных для структурного исследования белковых монокристаллов и расшифровкой пространственных структур занималась группа сотрудников, в состав которой входили биологи, физики и химики. Работы по определению и анализу пространственных структур гемовых белков (леггемоглобина и каталазы), неорганических пирофосфатаз, участвующих в биосинтезе и трансформации энергии в живых организмах, L-аспарагиназы, используемой при лечении ряда видов опухолей, вируса крапчатости гвоздики, а также саикарсинтазы, во-

влеченной в биосинтез пуринов, получили международное признание [3].

Сегодня технические возможности для структурных исследований существенно расширились: снижены требования к размеру белковых кристаллов, а для получения более совершенных успешно применяются новые методы их выращивания; усовершенствовано получение дифракционных наборов; современная вычислительная техника ускорила обработку дифракционных данных. Значительный прогресс в белковой кристаллографии достигнут благодаря созданию новых мощных источников рентгеновского излучения — синхротронов. В нашей стране такие исследования успешно ведутся на Курчатовском источнике синхротронного излучения (СИ) [4, 5]. К настоящему времени сотрудники Института кристаллографии установили строение и механизмы функционирования многих белков, внесли в международную базу данных атомные координаты более чем 150 белков и их комплексов с функционально важными молекулами.

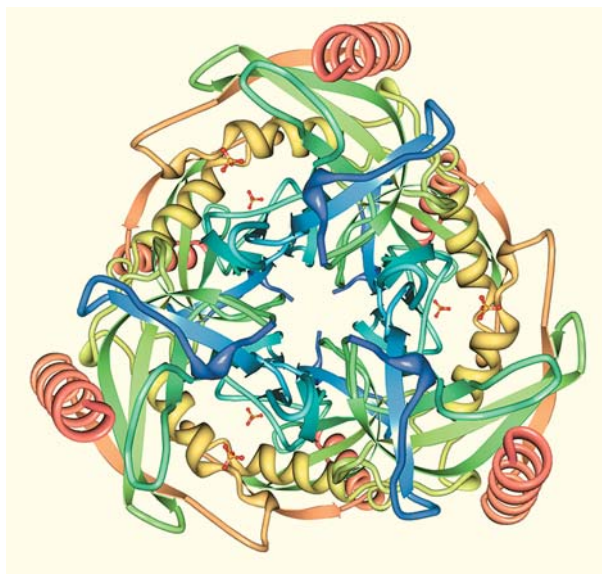
Изучаются структуры и механизмы действия ряда белков, важных для медицины и биотехнологии, таких как тимидинфосфорилаза, фосфоантетин-аденилилтрансфераза из туберкулезной бактерии, бактериальная карбоксипептидаза [6–8] и др. В лаборатории рентгеновских методов анализа и синхротронного излучения ИК РАН успешно продолжают эксперименты по выращиванию кристаллов белков в невесомости.

Как получают кристаллы белков

Рентгеноструктурный анализ и в настоящее время остается методом, дающим наиболее полную информацию о пространственной структуре белков и нуклеиновых кислот*.

Рентгеноструктурное исследование протекает в несколько этапов. Начинается оно с получения кристаллов выбранного для исследования вещества. На последующих этапах от белковых кристаллов на источниках рентгеновского излучения собирают дифракционные наборы, которые с помощью математического аппарата и специальных программ позволяют расшифровать строение изучаемой молекулы, т.е. установить пространственные координаты всех атомов (кроме водородных, положение которых определяют при разрешении менее 1 Å).

Биохимики давно обратили внимание на способность белков образовывать кристаллы и использовали кристаллизацию как одну из стадий очистки белков. Еще в 1840 г. немецкий исследователь Ф.Л.Хунефельд наблюдал под микроско-



Пространственная структура молекулы неорганической пирофосфатазы *Thermus thermophilus*.

пом формирование кристаллов гемоглобина червя; американский химик Дж.Б.Самнер в 1926 г. получил кристаллы фермента уреазы. За выделение и кристаллизацию ферментов он вместе с Дж.Х.Нортропом в 1946 г. был отмечен Нобелевской премией.

Однако для структурного исследования белковые кристаллы должны удовлетворять ряду требований [9]. Так, дифракционная картина от монокристаллов должна давать разрешение не ниже 2.5 Å. Для выращивания кристаллов с нужными свойствами разработаны специальные методики. Все они сводятся к смешиванию малых объемов растворов белка и осадителя (вещества, понижающего растворимость белка), но отличаются способом смешивания. В качестве осадителей обычно используют неорганические соли, амфифильные органические растворители, растворимые в воде органические полимеры, например, полиэтиленгликоли. Самый распространенный метод кристаллизации — диффузия паров растворителя в капле. Тогда на дне замкнутого сосуда находится раствор осадителя, а капля концентрированного раствора белка — например на «пьедестале». Другой метод — свободная диффузия через поверхность раздела между растворами белка и осадителя. В этом случае осадитель аккуратно наносят на поверхность белкового раствора, помещенного в капилляр или пробирку малого диаметра, после чего оба раствора смешиваются посредством диффузии. Очень проста кристаллизация под слоем парафинового масла, когда несколько микролитров раствора с равными объемами белка и осадителя заливают слоем парафинового масла. Медленное испарение раствора уменьшает скорость кристаллизации и способствует увеличению размера кристалла.

* О методе РСА для исследования пространственных структур белков подробнее см.: Владимирцов Ю.А. Зачем нужна белковая кристаллография // Природа. 2003. №11. С.26—40.

Сложности кристаллизации

Несмотря на усовершенствование техники рентгеновского анализа и методов кристаллизации, получение качественных белковых кристаллов продолжает оставаться наименее предсказуемым этапом, от которого зависит не только успех структурного исследования, но и время, затраченное на его проведение.

Одна из причин возникновения трудностей при поиске условий кристаллизации — отсутствие критериев для рационального выбора осадителя, способствующего формированию кристалла. Чтобы ускорить постановку проб для поиска условий, сегодня используют специальные роботы, которые позволяют поставить тысячи кристаллизационных проб в ограниченное время.

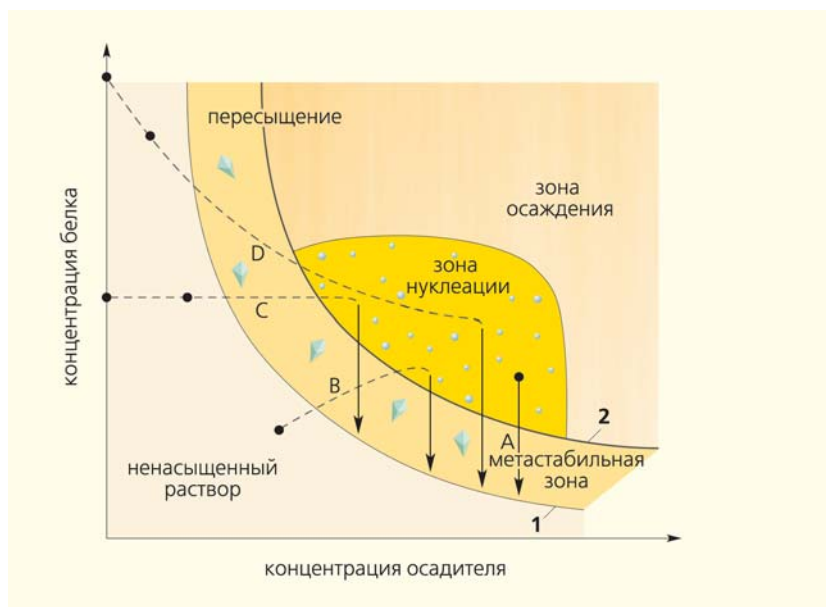
Другие затруднения вызваны тем, что, в отличие от кристаллов низкомолекулярных соединений, белковые кристаллы начинают формироваться только в сильно пересыщенном растворе. В этом случае одновременно происходят и образование зародышей кристаллов (нуклеация), и их рост. Из-за большого количества зародышей и высокой скорости роста появляется много мелких кристаллов. Для получения кристаллов большего размера и лучшего качества необходимо выращивать их в минимально пересыщенном растворе, в метастабильной зоне. Часто для разделения стадий нуклеации и роста используют так называемые

затравки: вносят в слабо пересыщенный белковый раствор ограниченное число зародышей или несколько микрокристаллов.

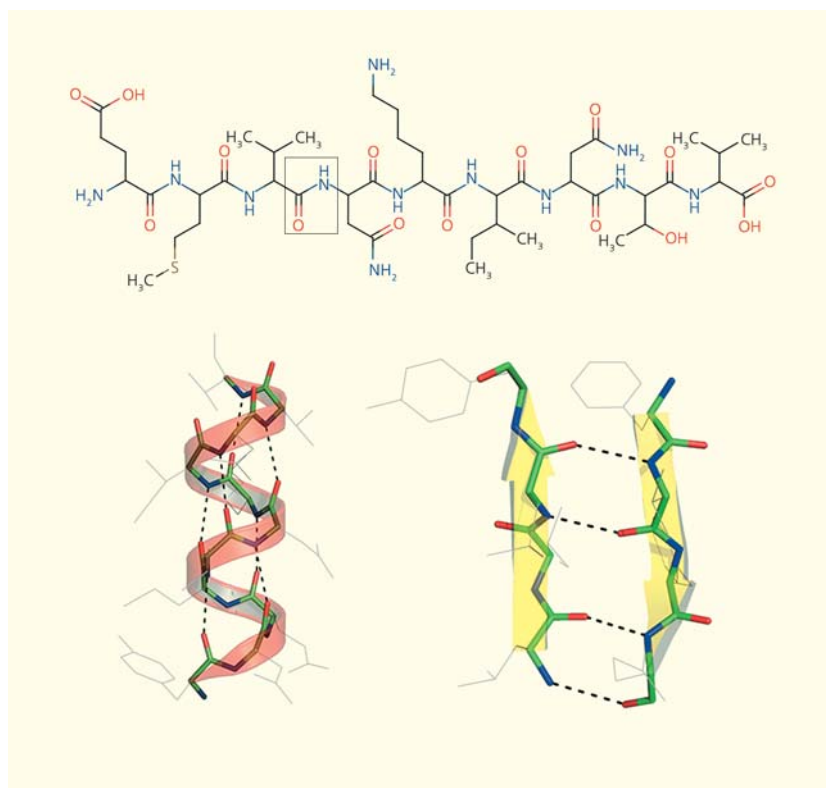
Однако главные причины, затрудняющие получение кристаллов растворимых глобулярных белков, кроются в свойствах самой белковой молекулы. Построенная из уникально уложенной полипептидной цепи, эта молекула с высокой молекулярной массой (от 1.5 до 500 КДа) имеет несколько уровней пространственной структуры — первичную, вторичную, третичную и четвертичную. Белковая глобула, поддерживаемая водородными связями и гидрофобными взаимодействиями, сохраняет свою структуру только в водном растворе (обычно в присутствии различных солей) и лишь в ограниченном интервале температур и значений pH. Очень часто молекула белка состоит из нескольких глобул (четвертичная структура), когда для повышения стабильности глобулы возникает необходимость спрятать оказавшиеся на поверхности гидрофобные аминокислотные остатки. Объем белковой глобулы с длиной цепи 220–250 аминокислотных остатков может достигать 1500 \AA^3 , а площадь ее поверхности около $8000\text{--}10\,000 \text{ \AA}^2$.

Полипептидная цепь белка распадается при бактериальном заражении. Белки денатурируют при высоких концентрациях органических растворителей и других реагентов, разрушающих водородные связи и гидрофобные взаимодействия.

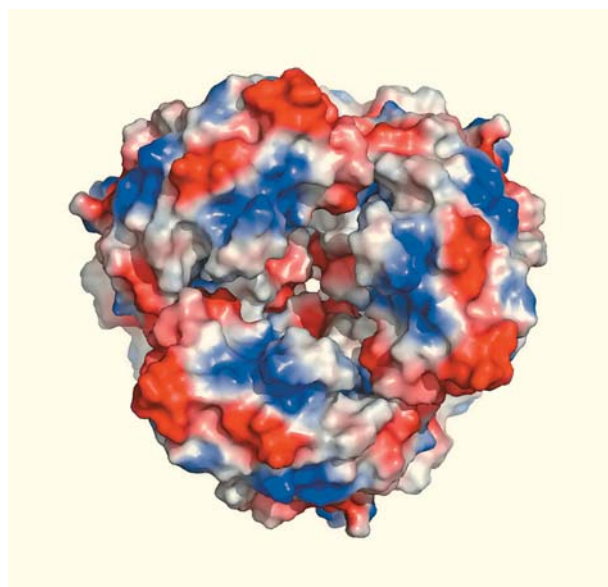
Кроме того, белки склонны к агрегации, имеют несколько минимумов растворимости и наряду с кристаллами образуют аморфные осадки. В то время как ядро белковой глобулы сформировано из гидрофобных боковых цепей, на ее поверхности имеется много полярных функциональных групп — нейтральных и несущих положительные или отрицательные заряды, а их сумма зависит от величины pH (меняется вместе с ней). Обилие на поверхности различных полярных групп создает сложный рельеф поверхности белка, так что его молекулу можно рассматривать как поливалентный ион. Хотя белковая глобула в определенных условиях имеет фиксированную структуру, на отдельных участках она может изменяться при взаимодействии с низкомолекулярными соединениями, субстратами и продуктами катализируемой реакции или с другими белками. Конформационная неоднородность затрудняет включение мо-



Фазовая диаграмма, показывающая растворимость белка как функцию концентрации осадителя. Приведены кривая растворимости (1) и кривая критического пересыщения (2), над которой белок выпадает в виде аморфного или мелкокристаллического осадка. В зоне нуклеации одновременно происходит образование кристаллических зародышей и рост мелких кристаллов. Оптимальные условия для роста крупных кристаллов — в метастабильной зоне (показано стрелками).



Элементы структуры белковой молекулы. Вверху — фрагмент полипептидной цепи (первичная структура); внизу — фрагменты вторичной структуры: α -спираль (слева) и β -слой (справа). Пунктирными линиями обозначены водородные связи.



Поверхность белка фосфопантетеин-аденилилтрансферазы *Mycobacterium tuberculosis*, окрашенная соответственно знаку заряда: серым — нейтральные полярные остатки; синим — положительно заряженные, красным — отрицательно заряженные аминокислотные остатки на поверхности молекулы.

лекул в кристаллическую решетку и может быть одной из причин неупорядоченности белкового кристалла. Высокая молекулярная масса белков, ограниченная устойчивость глобулы, нерегулярность поверхностного рельефа, переменная величина заряда, подверженность конформационным изменениям, а также способность образовывать неупорядоченные агрегаты — все это осложняет кристаллизацию белков.

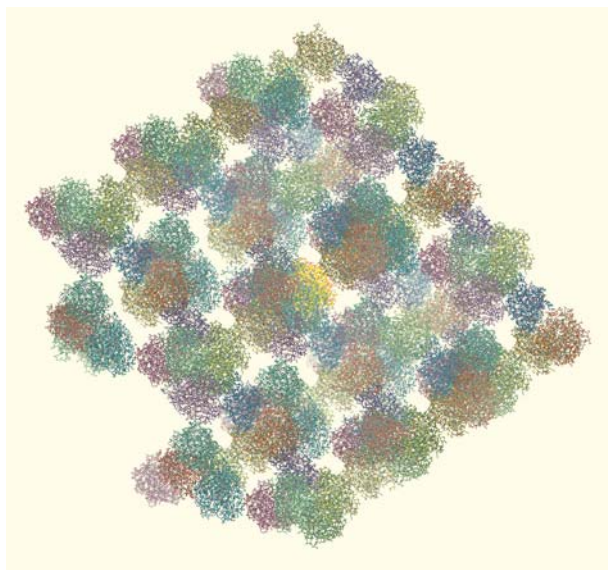
Свойства белковых кристаллов

В отличие от кристаллов обычных молекул, белковые имеют значительные параметры элементарной ячейки, часто более 100 Å, но размеры их невелики (до 0.3—0.5 мм). Сложный рельеф поверхности и обилие полярных функциональных групп, образующих связи с осаждающим раствором, способствуют появлению в белковом кристалле большого количества молекул воды. При этом кристаллическая решетка напоминает сеть, где

пространство между молекулами занято каналами, заполненными растворителем.

Высокое содержание воды в кристаллической решетке и малое число межмолекулярных связей на единицу поверхности молекулы определяют повышенную хрупкость белковых кристаллов, их подверженность радиационному распаду, приводит к появлению дефектов и к разупорядоченности кристаллической решетки. Такие кристаллы с высокой степенью мозаичности не дают четкой дифракционной картины и непригодны для рентгеноструктурного исследования. С другой стороны, именно благодаря большому количеству воды (от 30 до 80% объема кристалла) структура белка в кристалле не отличается от таковой в растворе.

Атомная модель молекулы, построенная с использованием координат, полученных при рентгеновском исследовании, позволяет найти корреляции между структурой и функцией белка. Анализ атомной модели дает возможность определить функционально важные участки и выделить аминокислотные остатки, подходящие для точечных замен, которые способны в нужном направлении изменить свойства молекулы, что особенно важно для модификации ферментов, используемых в биотехнологии. Чтобы изучить изменения, происходящие в молекуле белка при его функцио-



Укладка молекул белка в кристалле карбоксипептидазы *T. vulgaris*. Просветы внутри кристаллической решетки — заполненные водой каналы.

нировании, наряду со структурой «свободного» белка исследуют пространственную структуру его комплексов с субстратами, аналогами субстратов или ингибиторами реакции. Сравнивая полученные структуры, можно выявить конформационные изменения, сопровождающие работу белковой молекулы.

Координаты атомной модели — это основа для изучения молекулярных механизмов работы белков методами компьютерного моделирования: молекулярной динамикой и докингом. Последний

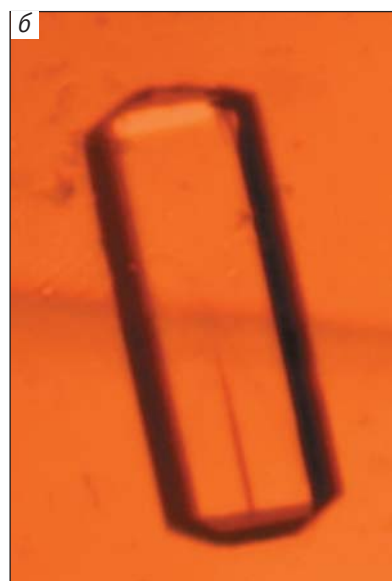
особенно востребован при поиске селективных ингибиторов ферментов, последующая модификация которых позволяет разработать лекарственные препараты нового поколения.

Чем точнее атомные координаты, полученные при рентгеноструктурном исследовании, тем надежнее результаты анализа пространственной структуры и эксперименты по моделированию. Приготовление кристаллов белков высокого дифракционного качества — важная и актуальная задача.

Кристаллизация в невесомости

Один из эффективных путей, позволяющих увеличить размер и улучшить дифракционное качество кристаллов белка, — это выращивание их в условиях невесомости [10]. Величина гравитации влияет на характер транспорта вещества к растущему кристаллу, от чего в значительной степени зависят степень упорядоченности кристаллической решетки и, следовательно, дифракционные качества кристалла. На Земле, при единичной гравитации, вещества доставляются к поверхности кристалла конвекционными потоками. По мере роста вокруг кристалла формируется обедненная белком зона, в которой раствор, имеющий меньшую плотность, поднимается вверх. Образующиеся при этом конвекционные потоки создают неодинаковые условия роста на разных участках поверхности кристалла, что отрицательно влияет на его качество.

В условиях невесомости (при пониженной гравитации) по мере встраивания молекул белка в кристаллическую решетку вокруг кристалла воз-



Выращенные на российском сегменте Международной космической станции в аппарате Модуль-1 кристаллы: лизоцима в ячейках прибора (а) и формиатдегидрогеназы *Arabidopsis thaliana*, полученный в том же приборе (б).



Выращивание кристаллов в невесомости методом встречной диффузии в капилляре. Слева — подготовительный наземный эксперимент: капилляр с белковым раствором погружен в пробирку с осадителем; справа — кристалл в капилляре с надетой силиконовой трубкой, наполненной агарозным гелем.

никает стабильный концентрационный градиент белковых молекул. Благодаря этому растущая поверхность кристалла контактирует со слабо пересыщенным раствором, и кристалл растет в оптимальных условиях. Кроме того, при диффузионном транспорте, преобладающем в этих условиях, скорость роста замедляется, и молекулы с большей энергией, первоначально присоединившиеся неправильно, могут диссоциировать от кристалла и при повторном присоединении занять оптимальное положение. Это понижает мозаичность кристаллов и увеличивает их совершенство.

На Земле и в невесомости кристалл в растворе — объект броуновского движения. В наземных условиях кристаллы, достигшие определенного размера, осаждаются и продолжают расти на дне сосуда, что может нарушить их конечную форму. В невесомости кристалл плавает вблизи поверхности раствора и не опускается на дно. Сферическая симметрия диффузионного поля обеспечивает равномерную доставку вещества ко всем граням кристалла, способствуя росту изометричных кристаллов.

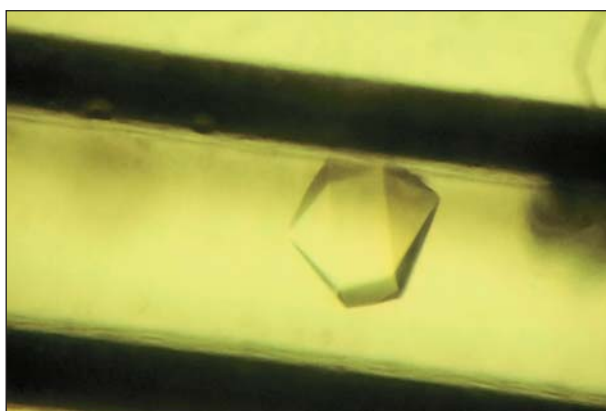
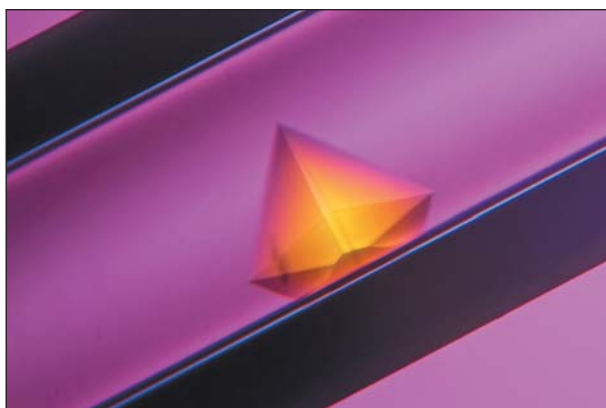
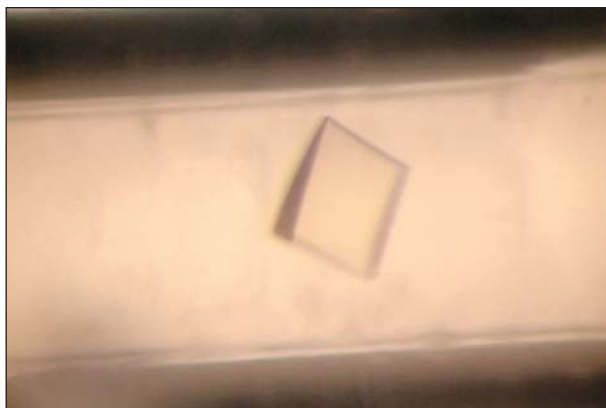
Эксперименты по кристаллизации белков на космических летательных аппаратах, главным образом на российской космической станции «Мир» (1981—1996), показали, что дифракционное качество белковых кристаллов, выращенных в условиях невесомости, превосходит таковое контрольных наземных кристаллов.

С 2005 г. Институт кристаллографии совместно с Центральным научно-исследовательским институтом машиностроения Роскосмоса участвует в проекте «Кристаллизатор», задача которого — выращивание в невесомости белковых кристал-

лов высокого дифракционного качества [11]. Для этой работы в конструкторском бюро института были сконструированы несколько специальных аппаратов, в частности аппарат «Модуль-1», в котором кристаллизация осуществлялась методом свободной диффузии*. Кристаллы рекомбинантного инсулина человека, формиатдегидрогеназы растений, карбоксипептидазы и пирофосфатазы, выращенные в этом аппарате, по величине и разрешению превосходили кристаллы тех же белков, полученные в наземных условиях [10—13].

В настоящее время эксперименты по кристаллизации белков в невесомости продолжают в рамках международного сотрудничества между Роскосмосом и Японским аэрокосмическим агентством JAXA. В этих опытах применяется метод встречной диффузии в капилляре, предложенный учеными из Университета Гранады и усовершенствованный японскими исследователями [14]. Здесь раствор осадителя проникает в раствор белка, находящегося в капилляре, через надетую на его конец силиконовую трубку, которая заполнена агарозным гелем и погружена в раствор осадителя. При этом смешивание растворов белка и осадителя замедляется, а по длине капилляра устанавливается градиент концентрации осадителя. По мере удаления от начала капилляра кристаллы растут при уменьшающемся пересыщении. Таким способом в невесомости выращены кристаллы ряда белков: бактериальной карбоксипептидазы *Thermoactinomyces vulgaris*; фосфопантетеин-аденилилтрансферазы *Mycobacterium tuberculosis* и ее ком-

* Ковальчук М.В. и др. патент №2307204 (от 27.09.2007 г.) на изобретение: «Устройство для кристаллизации».



Кристаллы фосфопантетеин аденилилтрансферазы, тимидинфосфорилазы и карбоксипептидазы *T. vulgaris*, выращенные на Международной космической станции в японском модуле «Кибо» методом встречной диффузии (российско-японский проект).

плексов с субстратом, ингибитором и продуктами реакции; тимидинфосфорилазы из *E. coli* в комплексе с терапевтически важными аналогами природных нуклеозидов [15]. Как показало рентгеновское исследование, дифракционное поле «космических» кристаллов на $0.3\text{--}0.4\text{ \AA}$ превышает поле контрольных наземных. С помощью выращенных кристаллов пространственная структура исследуемых белков установлена в интервале разрешений от 1.05 до 1.7 \AA .

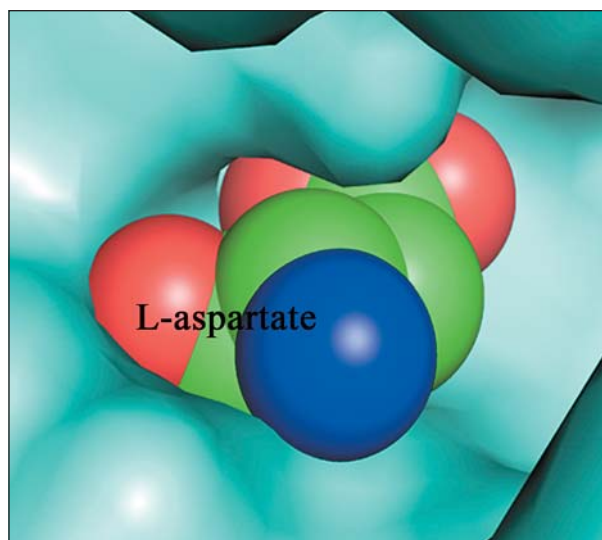
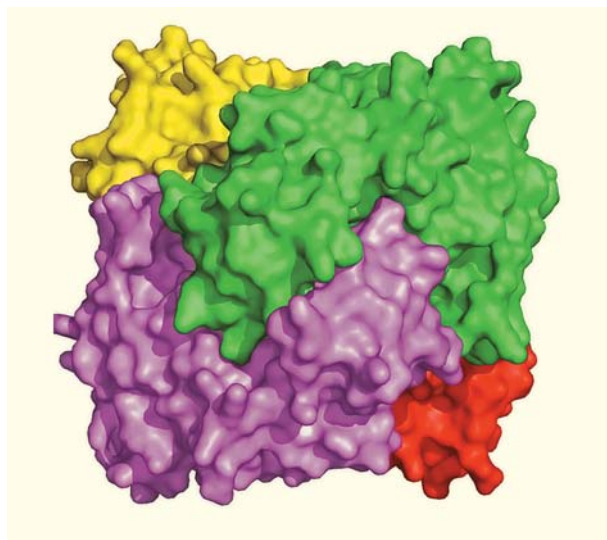
От кристалла к пространственной структуре

Вот несколько примеров, которые иллюстрируют применение атомных моделей, полученных при рентгеновском исследовании, для изучения структурных основ функционирования белковой макромолекулы.

Фермент аспарагиназа, катализирующий превращение аспарагина в аспарагиновую кислоту (аспартат), — редкий пример белка, непосредственно используемого в онкотерапии. Этот фермент создает в клетках, особенно в лейкозных, дефицит аспарагина, который активно участвует в метаболизме и входит в состав белков. Наиболее чувствительны к действию аспарагиназы опухолевые клетки, в которых собственный аспарагин не синтезируется. Из-за его отсутствия синтез белка уменьшается или вовсе прекращается, одновременно прекращается рост опухоли. Недостаток аспарагиназы как лекарственного средства — ее токсичность: наряду с аспарагином она с малой скоростью расщепляет и глутамин, основной переносчик аминокислот в организме. Понизить токсичность аспарагиназы можно, уменьшив ее глутаминазную активность.

Большой объем белковой молекулы обеспечивает стабильность пространственной структуры, в частности фиксированную геометрию аминокислот, расположенных в активном центре белка-фермента. В то же время активный центр, в котором непосредственно протекает катализируемая ферментом реакция, обычно расположенный в углублении на поверхности фермента, занимает лишь небольшой участок поверхности. Замечательная особенность белков — высокая избирательность их действия (специфичность): белок способен отбирать из окружающего раствора и связывать в активном центре только соединения строго определенного строения. Такие соединения называют субстратами, если после связывания они подвергаются действию фермента, или ингибиторами, если, оказавшись в активном центре, они не испытывают дальнейших превращений. Замечательная особенность субстратов — их комплементарность (соответствие) поверхности активного центра, к которой они подходят, как ключ к замку или как хрустальная туфелька Золушке. Связывание субстрата в центре с комплементарной ему поверхностью существенно снижает энергетический барьер для протекания реакции, на чем и основан катализ ферментами.

Поскольку реакция, катализируемая аспарагиназой, обратима, аспартат, продукт ферментативной реакции, при определенных условиях остается связанным в активном центре. Проведенное нами исследование пространственной структуры аспарагиназы и ее комплексов с глутаматом и аспартатом показало, что молекула аспартата, комплементарная поверхности активного центра, свободно в него вписывается, в то время как свя-



Тетрамерная молекула аспарагиназы *Erwinia carotovora* (субъединицы молекулы окрашены в разные цвета). Справа — молекула аспартата в активном центре аспарагиназы. Атомы аспартата показаны сферами радиуса Ван-дер-Ваальса.

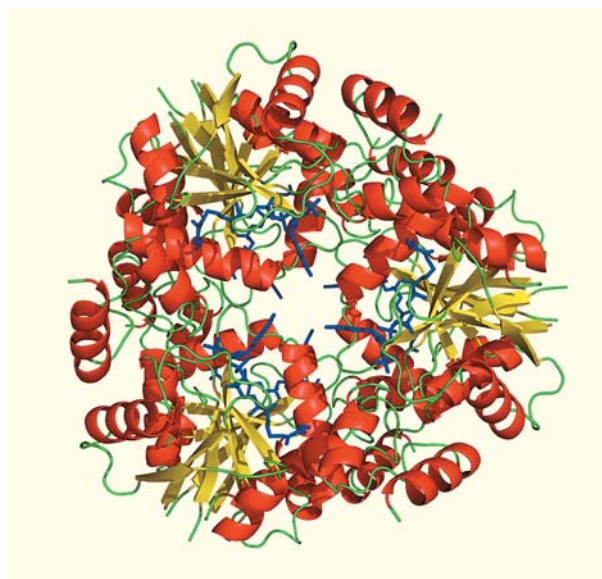
зывание большей по объему молекулы глутамата пространственно затруднено [16]. Полученные данные о строении активного центра и топологии его поверхности дают возможность выбрать место для точечной замены в активном центре и получить мутантную форму фермента с более низким средством к глутамату.

Данные о пространственной структуре белков широко используются для рационального поиска эффективных лекарственных средств. Развитие многих заболеваний можно остановить, если блокировать работу белков, необходимых для жизни болезнетворных вирусов и бактерий, или активность ферментов, требующихся, например, для роста опухоли. Белки, инактивация которых вызывает гибель патогенных организмов или прекращает развитие определенной болезни, называются белками-мишенями. Их ингибиторы могут стать лечебными средствами, но, чтобы превратить их в настоящие лекарства, необходимо химически модифицировать их структуру, увеличив их сродство к белку-мишени. Данные о строении и топологии поверхности активного центра белка-мишени, полученные в результате рентгеноструктурного исследования, существенно облегчают и ускоряют рациональный поиск соединений-ингибиторов.

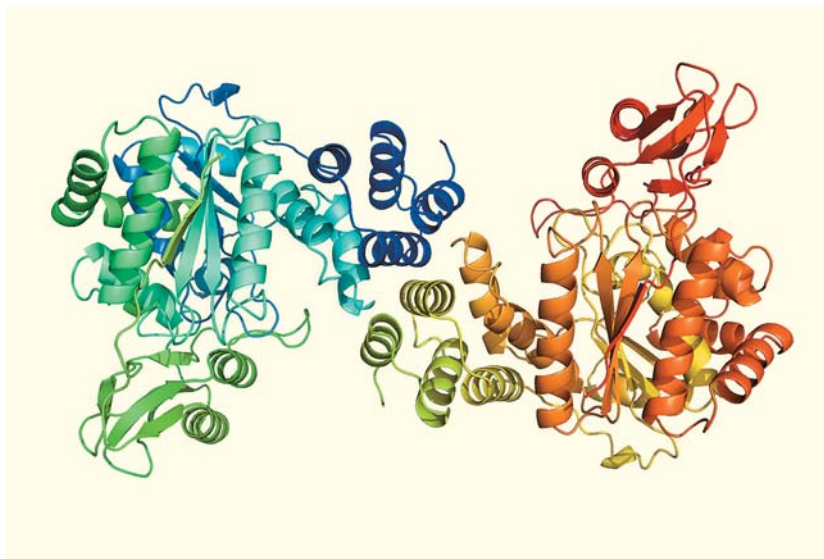
Таким белком-мишенью для конструирования лекарств против туберкулеза стал недавно изученный нами белок — фосфопантетеин-аденилилтрансфераза из *Mycobacterium tuberculosis* (PPATMt). Одна из трудностей борьбы с туберкулезом связана с чрезвычайно высокой адаптивностью его возбудителя, бактерии *M.tuberculosis*, к действию антибиотиков. PPATMt катализирует предпоследнюю стадию биосинтеза кофермента А (CoA), жизненно важного для туберкулезной бактерии. Поскольку

катализируемая PPAT реакция является ключевой, определяющей скорость всего процесса, PPATMt служит подходящей мишенью для действия противотуберкулезных лекарств, а ингибиторы PPAT — потенциальными противотуберкулезными препаратами.

Мы исследовали пространственные структуры свободного фермента и комплексов PPAT с субстратом, ингибитором и продуктом реакции [17]. По-



Гексамерная молекула фосфопантетеин-аденилилтрансферазы *M.tuberculosis* со связанным лигандом — дефосфокоферментом А (показан синим цветом). В центре гексамера находится заполненный растворителем канал, внутри которого, на обращенной внутрь канала поверхности молекулы, расположены активные центры субъединиц.



Димерная молекула тимидинфосфорилазы *E. coli*. Домены в каждой субъединице окрашены в разные цвета.

скольку каждая из структур отражает состояние молекулы на одной из стадий катализируемой реакции, мы проследили сопровождающие ее конформационные изменения и установили ее структурный механизм. Оказалось, что на разных стадиях реакции четвертичная структура молекулы фермента перестраивается, так что в гексамерной молекуле меняется диаметр внутреннего канала, через который субстраты доставляются в активный центр. Нами выявлены аминокислотные остатки, запускающие эти конформационные изменения. Данные о топологии связывающих участков активного центра важны для рационального конструирования ингибиторов фермента — потенциальных противотуберкулезных лекарств.

Еще один, важный для медицины и биотехнологии фермент, недавно исследованный нами при разрешении 1.55 Å, — тимидинфосфорилаза (ТФ) *E. coli* [15]. Тимидинфосфорилаза, катализирующая фосфорилирование нуклеозидов, будучи ключевым ферментом нуклеозидного обмена, играет важную роль в так называемом запасном (дополнительном) пути синтеза нуклеозидов. Природные нуклеозиды служат структурными компонентами нуклеиновых кислот, выступают кофакторами ферментов и участвуют в процессах трансформации энергии, в передаче сигналов и т.д. Аналоги природных нуклеозидов находят широкое применение в качестве противораковых и антивирусных средств. Например, азидотимидин (фармакологическое название — зидовудин), который отличается от природного субстрата тимидинфосфорилазы только присутствием азидогруппы в дезоксирибозном кольце, используется для лечения синдрома приобретенного иммунодефицита человека (СПИДа).

Тимидинфосфорилаза *E. coli* широко применяется в биотехнологии как катализатор для синтеза производных нуклеозидов. В высших организмах ТФ вовлечена в процессы ангиогенеза, в том числе в раковых клетках. Стимулируя рост кровеносных сосудов, она способствует росту опухоли. В то же время тимидинфосфорилаза участвует в активации некоторых антираковых препаратов. Двойная роль тимидинфосфорилазы делает актуальным поиск как ингибиторов этого фермента, потенциальных антиопухолевых лекарств, так и соединений, регулирующих ее активность.

Мы показали, что такие терапевтически важные соединения, как азидотимидин и 3'-азидо-2'-фтор-2',3'-дидезоксиуридин являются обратимыми ин-

гибиторами тимидинфосфорилазы [15]. Благодаря выращенным в невесомости кристаллам структура ТФ установлена при более высоком (1.52 Å), чем ранее (2.8 Å), разрешении, а также впервые определены пространственные структуры комплексов ТФ с аналогами нуклеозидов, содержащими азидогруппу, в том числе с азидотимидином. Оказалось, что используемые в медицине в качестве лекарственных препаратов аналоги нуклеозидов, содержащие азидогруппу, не являются строго селективными и, наряду с белком-мишенью (для зидовудина это обратная транскриптаза), взаимодействуют и с другими ферментами нуклеозидного обмена. Полученные структурные результаты объясняют также, почему эти соединения, очень мало отличающиеся по строению от субстратов, не расщепляются ферментом. Оказалось, что, хотя они связаны в том же центре, что и субстрат, и пиримидиновые основания в них частично перекрываются с пиримидиновым основанием субстрата, в азидонуклеозидах пиримидиновые основания нуклеозидов повернуты по отношению к субстрату на 180° вокруг оси, соединяющей атомы N3 и C6 основания. Благодаря этому подлежащая расщеплению гликозидная связь в азидонуклеозидах оказывается удаленной от аминокислотных остатков активного центра, катализирующих реакцию фосфорилирования.

* * *

Мы рассказали о наиболее распространенных методах, которые применяются (в том числе и в условиях невесомости) для выращивания кристаллов водорастворимых глобулярных белков, пригодных для структурного исследования; описали особенности строения белков, влияющие на

их способность образовывать кристаллы, а также строение самих белковых кристаллов. Привели примеры пространственных структур некоторых важных для медицины и биотехнологии белков, которые исследуются с помощью выращенных в Институте кристаллографии кристаллов; показали, как результаты структурного анализа используются для изучения механизмов функционирования макромолекул.

В настоящее время число работ в области белковой кристаллографии постоянно растет. Это объясняется значительным вкладом этого направления в решение таких задач, как рациональный дизайн лекарств, изучение механизмов ферментативных реакций и работы биосистем, объяснение влияния мутаций, конструирование новых искусственных ферментов, надежная оценка динамики

белков. Появляются новые методы кристаллизации белков, например кристаллизация *in vivo* — непосредственно после экспрессии в клетке. В числе приоритетных задач остаются кристаллизация и исследование структур сложных белковых ансамблей, а также мембранных белков. Они составляют около 30% общего количества белков, но пространственные структуры известны только для 300. Это объясняется главным образом трудностями кристаллизации мембранных белков. Можно надеяться, что использование новейших источников рентгеновского излучения, например рентгеновских лазеров на свободных электронах (XFEL), позволит в ближайшем будущем изучать сложные биологические структуры, используя для этой цели микрокристаллы или даже отдельные биомacroмолекулы. ■

Литература

1. Ковальчук М.В., Попов В.О. Рентгеновское и синхротронное излучение — путь к познанию структуры биомacroмолекул // Наука в России. 2013. №3. С.4—12.
2. Ковальчук М.В. Кристаллография на рубеже веков: итоги и перспективы // Кристаллография. 1999. Т.44. №6. С.967—975.
3. Куранова И.П. Рентгеноструктурные исследования биологических макромолекул в Институте кристаллографии РАН // Кристаллография. 2001. Т.46. №4. С.667—686.
4. Kovalchuk M.V., Shilin Yu. N., Zeludeva S.I. et al. X-Ray instrumentation for SR beamlines // Nuclear Instr. and Methods in Physics Research. 2000. V.A448. P. 112—119.
5. Хейкер Д.М., Ковальчук М.В., Шилин Ю.Н. и др. Станция белковой кристаллографии на пучке СИ из поворотного накопителя «Сибирь-2» // Кристаллография. 2007. Т.52. №2. С.374—380.
6. Тимофеев В.И., Абрамчик Ю.А., Фатеев И.В. и др. Пространственная структура тимидинфосфорилазы *E.coli* в комплексе с 3'-азидо-2'-фтор-2',3'-дидезоксиуридином // Кристаллография. 2013. Т.58. №6. С.828—839.
7. Тимофеев В.И., Смирнова Е.А., Чупова Л.А. и др. Пространственная структура фосфопантетеин-аденилилтрансферазы из *Mycobacterium tuberculosis* в апоформе и в комплексах с коферментом А и с дефосфокоферментом А // Кристаллография. 2012. Т.57. №1. С.26—34.
8. Тимофеев В.И., Кузнецов С.А., Акпаров В.Х. и др. Пространственная структура карбоксипептидазы Т из *Thermoactinomyces vulgaris* в комплексе с N-БОК-L-лейцином // Биохимия. 2013. Т.78. №3. С.
9. Куранова И.П. Выращивание кристаллов растворимых белков // Биохимия. 1990. Т.55. Вып.11. С.1923—1940.
10. Куранова И.П. Кристаллизация белков на Земле и в невесомости // Поверхность. 2004. №6. С.4—12.
11. Смирнова Е.А., Кислицын Ю.А., Сосфенов Н.И. и др. Выращивание кристаллов белков на российском сегменте Международной космической станции // Кристаллография. 2009. Т.54. №5. С.948—958.
12. Timofeev V.I., Chuprov-Netochin R.N., Samygina V.R. et al. X-ray investigation of gene-engineered human insulin crystallized from a solution containing polysialic acid // Acta Cryst. 2010. V.F66. P.259—263.
13. Шабалин И.Г., Серов А.Е., Скиргелло О.Е. и др. Рекомбинантная форматдегидрогеназа *Arabidopsis thaliana*. Получение, кристаллизация в условиях невесомости и предварительное рентгеновское исследование кристаллов // Кристаллография. 2010. Т.55. №5. С.855—859.
14. Tanaka H., Inaka K., Sugiyama Sh. et al. A simplified counter diffusion method combined with a 1D simulation program for optimizing crystallization conditions // J. Synchrotron Rad. 2004. V.11. P.45—48.
15. Куранова И.П., Смирнова Е.А., Абрамчик Ю.А. и др. Выращивание кристаллов фосфопантетеин-аденилилтрансферазы, карбоксипептидазы Т и тимидинфосфорилазы на Международной космической станции методом встречной диффузии в капилляре // Кристаллография. 2011. Т.56. №5. С.941—948.
16. Kravchenko O.V., Kisilitsin Yu.A., Popov A.N. et al. Three-dimensional structures of L-asparaginase from *Erwinia carotovora* complexed with aspartate and glutamate // Acta Cryst. 2008. V.D64. P.248—256.
17. Timofeev V., Smirnova E., Chupova L. et al. X-ray study of the conformational changes in the molecule of phosphopantetheine adenyltransferase from *Mycobacterium tuberculosis* during the catalyzed reaction // Acta Cryst. 2012. V.D68. P.1660—1670.

Загрязнение морских акваторий при добыче нефти

И.А.Немировская

Центр работ нефтегазового комплекса все дальше перемещается в море. По некоторым прогнозам к 2020 г. морская добыча углеводородов может составить 30%. Сейчас начальные извлекаемые ресурсы нефти и газа континентального шельфа (в пересчете на нефть) оцениваются в 90–100 млрд т, что соответствует 20–25% общемировых запасов углеводородов. Увеличение масштабов их добычи, интенсификация перевозок нефти и нефтепродуктов, строительство и эксплуатация новых транспортных коридоров ведут к повышению риска возникновения аварийных ситуаций. Вопреки распространенному мнению, разливы — не главный источник нефтяного загрязнения Мирового океана. Наибольшие потери углеводородов связаны с их морской транспортировкой из районов добычи [1]. Половина добываемой на шельфе нефти (около 2 млрд т в год) перевозится танкерным флотом, около 0.03% ее теряется по различным причинам.

Потери при авариях в процессе работ на береговых терминалах и при перекачке нефти по подводным трубопроводам составляют соответственно 5 и 10% от добычи. Суммарный вклад в загрязнение морской среды от транспортировки нефти танкерами и трубопроводами составляет в среднем около 20%. Это почти в четыре раза мень-



Инна Абрамовна Немировская, доктор геолого-минералогических наук, заведующая аналитической лабораторией Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН. Область научных интересов — нефтяные и природные углеводороды в океане. Постоянный автор «Природы».

ше, чем вклад всех других источников. Однако неизбежным спутником любых танкерных операций были и продолжают оставаться аварии, которые до сих пор считаются одним из основных источников экологического риска. С 1970 по 2009 г. около 5.65 млн т нефти попало в море именно таким путем [2]. Большинство танкерных аварий пришлось на 70-е годы прошлого века. Они составили 53% от общего количества крупных (>7 тыс. т) разливов. Но с каждым годом подобных чрезвычайных ситуаций становится все меньше. Вероятность разливов нефти и их объемы зависят от ряда факторов: интенсивности судоходства, конструкции танкера, условий навигации и др.

При буровых работах выделяются две группы аварий. Первая охватывает редкие, но наиболее масштабные разливы катастрофического характера. Во вторую входят штатные ситуации с относительно небольшими утечками топлива. Официальная статистика, как правило, учитывает разливы нефти, которые легче проконтролировать. Наиболее сильное загрязнение моря происходит при разведочном бурении, когда вскрывается нефтепродуктивный пласт. Скважина часто начинает фонтанировать, что приводит к поступлению в окружающую среду пластовых флюидов (нефти, газоконденсата, вод с растворенными углеводородами). Считается, что вклад утечек при бурении и эксплуатации скважин в загрязнение акваторий минимален (менее 0.2%) [3]. В то же время, по подсчетам специалистов, с 1975 г. на планете произошло около 60 серьезных аварий на морских нефтедобывающих платформах [2]. Большинство их связано с Мексиканским заливом и северо-восточным побережьем США. Кроме того, аварии зафиксированы в Средиземном и Северном морях, а также в районах китайского побережья Желто-



Тушение пожара на платформе «Deepwater Horizon» 21 апреля 2010 г. Снимок сделан Береговой охраной США.

го моря. В Мексиканском заливе площадью 1543 тыс. км² в эксплуатации находятся 634 платформы и 39 газовых вышек. Добычу нефти и природного газа осуществляют 30 компаний. Среднесуточный объем полученной на шельфе нефти составляет 1.6 млн баррелей, а природного газа — 6.6 млрд м³. В апреле 2010 г. в Мексиканском заливе взорвалась нефтедобывающая платформа «Deepwater Horizon», принадлежащая швейцарской компании «Transocean» и арендованная на 2009—2013 гг. британской корпорацией «British Petroleum». В морскую среду ежедневно на протяжении 92 дней поступало около 800 т нефти. Вылилось до 780 тыс. т нефти, которая покрыла от 8 до 24 тыс. км² морской поверхности. Пострадало побережье США на протяжении 1200 км — от Техаса до Луизианы (включая устье Миссисипи). Однако через несколько недель после ликвидации аварии нефть в заливе практически полностью исчезла [2]. На космических снимках 15 октября 2010 г., кроме небольших пятен вблизи дельты Миссисипи, загрязнение не наблюдалось. Море совместно с диспергаторами справилось с задачей очищения своей поверхности. Но необходимо напомнить, что в этом районе в результате природного высачивания выбрасываются сотни

тысяч нефти в год и Мексиканский залив «натренирован» для разложения углеводородов.

В качестве точечного долговременного источника загрязняющих веществ при добыче топлива можно рассматривать и энергетические установки на буровых платформах, сжигающие нефть и попутный газ. Потенциальные источники таких загрязнений — перспективные для промышленной разработки месторождения нефти и газоконденсата на шельфе Баренцева и Карского морей.

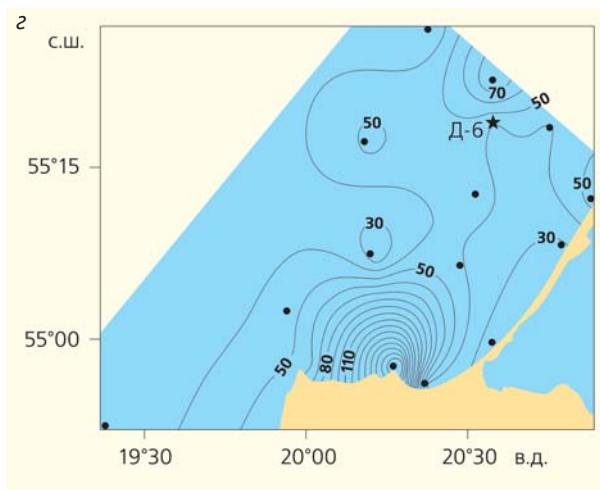
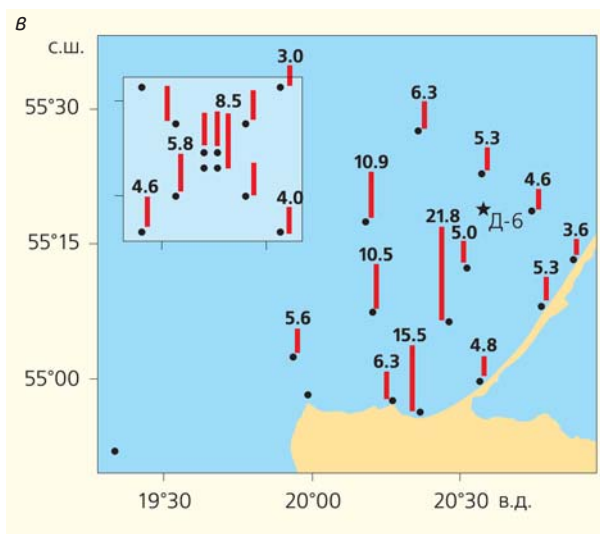
В зависимости от технического решения каждого проекта разработка месторождения осуществляется с помощью одной или нескольких буровых платформ. На каждой из них будет проводиться бурение 9—12 скважин со скоростью четыре-пять скважин в год. А при опробовании только одной скважины в море может поступить свыше 350 т нефти, в том числе одни из самых токсичных — полициклические-ароматические углеводороды. По некоторым оценкам, при морской нефтегазодобыче в атмосферу выбрасывается до 30% сжигаемых в факелах углеводородных соединений, которые образуют характерные устойчивые пленки вокруг платформ [3]. Регулярные наблюдения в Северном море показали, что частота встречаемости таких пленок составляет один-два

случая на каждый час полета, а максимальная их плотность тяготеет к районам интенсивного судоходства и нефтепромыслов. Однако из-за удаленности последних от берегов и крупных промышленных центров этой проблеме до сих пор не уделяется должного внимания (как в исследовательском, так и в промышленном плане).

При добыче топлива в акватории месторождения обычно проводится многодисциплинарный мониторинг, определяющий экологическое состояние района. Современное изучение поведения углеводородов в море включает не только исследование их содержания, состава, но и определение вклада разных источников в загрязнение среды. Проведение мониторинга осложняется существованием естественного углеводородного фона, возникающего из-за флюидных потоков углеводородов из осадочной толщи. Эти потоки сосредоточены в районах нефтегазовых бассейнов, акватории

которых занимают 10–15% общей площади Мирового океана [4]. По последним данным, роль таких флюидных углеводородов в общем балансе составляет около 600 тыс. т/год, т.е. 48% от их суммарного поступления в океан [5]. На российском арктическом шельфе просачивание нефти впервые описано в XVI в. на банке р.Ухты (на севере Тимано-Печорского р-на), где в песке были найдены смоляные комки [6]. Учитывая высокую нефтегазоносность арктического шельфа России, следует полагать, что этот природный источник обеспечивает не менее 50% от общего поступления нефти в арктические моря. Такой вывод подтверждается и данными о распределении органического вещества в здешних донных осадках.

Кравцовское месторождение. Примером многодисциплинарного мониторинга экологического состояния моря служат ежегодные исследования, проводимые в юго-восточной части Балтий-



Платформы Д-6 в Балтийском море (а), ее положение на шельфе (б), распределение углеводородов (мг/г) в поверхностном слое донных осадков в 2013 г. в районе мониторинга, на врезке — на локальном полигоне вокруг платформы (в) и распределение углеводородов (мг/л) в поверхностных водах в 2012 г. (г).

ского моря, в акватории Кравцовского месторождения, где добыча нефти ведется с 2004 г. [7]. Производственно-промышленный комплекс состоит из ледостойкой стационарной платформы Д-6 (в 23 км от Куршской косы), морского подводного трубопровода длиной 38 км, нефтеотборного пункта (в 5 км от Куршской косы) и системы наземных трубопроводов, которые тянутся до нефтяного терминала на побережье. Проводимые исследования показали, что в последние годы в этом районе Балтийского моря ситуация, связанная с нефтяным загрязнением, не только не ухудшилась, но и наоборот — улучшилась. Если в 2008 г. в осадках в районе платформы содержание углеводородов достигало 480 мкг/г (в среднем 70 мкг/г), то летом 2013 г. — всего 5 мкг/г. Оно оказалось даже ниже их фоновых концентраций в песчаных отложениях (10 мкг/г) [4]. В донных осадках в непосредственной близости от платформы были обнаружены углеводороды преимущественно нефтяного генезиса, а на некотором удалении от платформы в их составе преобладали устойчивые терригенные соединения, принесенные с берега.

По гидрофизическим данным в этом районе были зафиксированы зоны активизации геодинамических процессов, способствующих поступлению природных углеводородов в море. В осадках в районе платформы Д-6 в 2008–2010 гг. были обнаружены нефтяные комки, которые встречались и в осадках Мексиканского залива, и в районе Штокманского месторождения [4]. После землетрясения 2004 г. стало ясно, что Калининградская обл. и примыкающая акватория Балтийского моря отнюдь не безопасны в сейсмическом отношении, и потому в программу мониторинга вошли и сейсмологические наблюдения. На побережье Самбийского п-ова и на пляжах Литвы также обнаружены нефтяные агрегаты, связанные с естественным высачиванием нефти из осадочной толщи [4].

При эксплуатации Кравцовского месторождения соблюдается принцип минимизации ущерба, наносимого окружающей среде, — так называемый нулевой сброс, который означает запрещение любого сброса в море. Отходы транспортируются для утилизации на берег [7]. За весь период наблюдения ни одного пятна вблизи платформы Д-6 и по трассе подводного трубопровода обнаружено не было [2]. Основные источники загрязнений этого района Балтийского моря оставались прежними: несанкционированный сброс нефте-



Осадок с нефтяными комками, собранный в 2008 г. в районе платформы Д-6.

продуктов с судов и вынос сточных и промышленных вод реками из Калининградского обводного канала. Судовые загрязнения традиционно происходят на якорной стоянке в районе Балтийска, на основных трассах вдоль о.Готланд, севернее Гданьского залива и на подходах к крупным портам — Клайпеде, Лиепая, Вентспилсу и Гданьску. Таким образом, максимум концентраций углеводородов в воде наблюдается в береговой зоне.

Известно, что в акваториях, где возможны потоки нефти со дна, скорость их выхода сильно меняется [3]. Возможно, именно этим объясняется изменчивость от года к году концентраций углеводородов в осадках в районе платформы Д-6. В зависимости от условий в нефтегазоносных горизонтах и геологических структурах под морским дном высачивания то активизируются, то на время прекращаются либо вовсе исчезают, а затем появляются вновь. Кроме того, в районах, где распространены флюидные потоки, на поверхности осадков развиваются нефтеокисляющие микроорганизмы [3].

Шельф о.Сахалина в Охотском море.

На сегодняшний день здесь осуществляется наиболее масштабная добыча нефти в нашей стране. В этом районе открыты и разведаны 10 крупных нефтегазовых месторождений с общими извлекаемыми запасами углеводородов 5 млрд т условного топлива [1]. Сахалинские проекты предусматривают круглогодичное использование на северо-восточном шельфе острова стационарных платформ ледового типа и крупнотоннажных танкеров, а также строительство нефтяных терминалов, завода по сжижению природного газа, систему наземных и подводных нефтепроводов и других объектов.

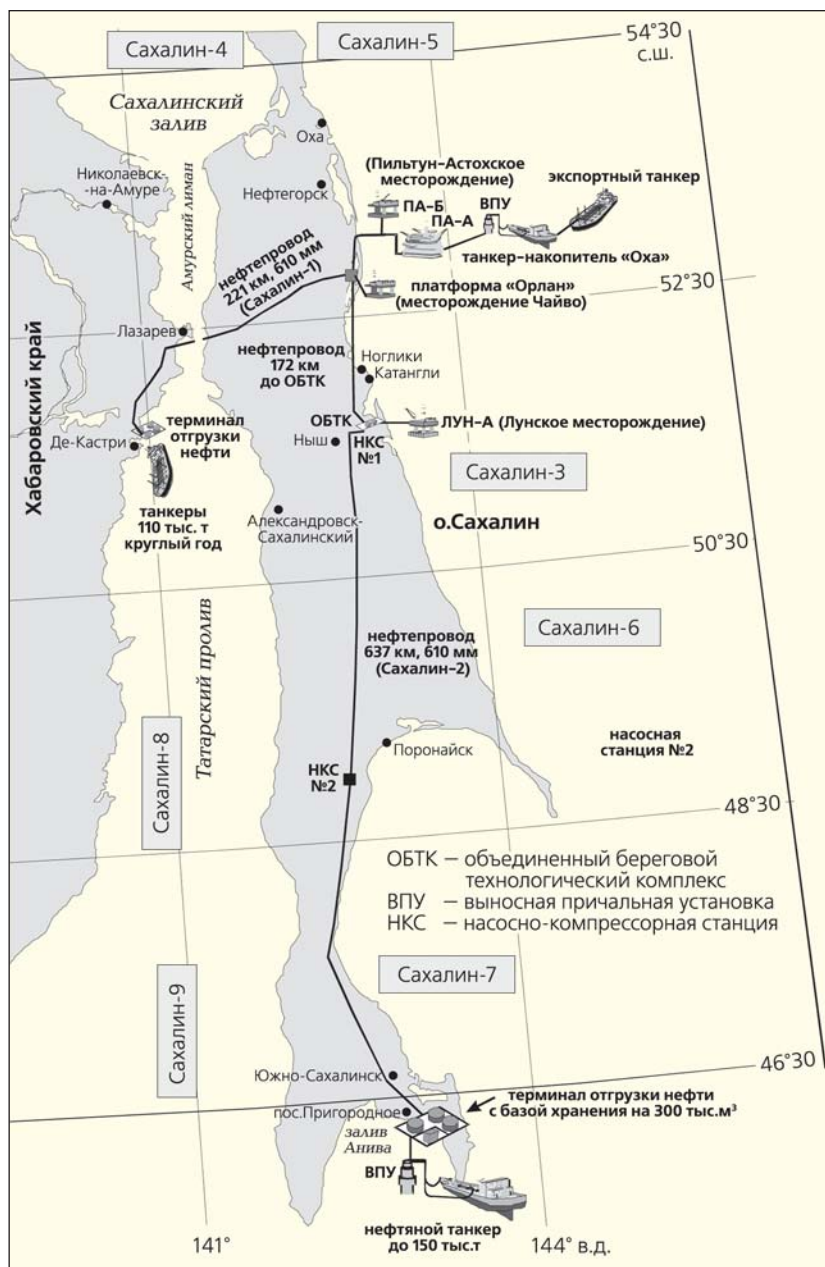


Схема основных месторождений на шельфе о.Сахалина [1].

Климатические условия Охотского моря очень тяжелые. Продолжительность ледового сезона колеблется от 8 до 10, а в исключительно суровые годы — и до 11 мес. Образование льда начинается в октябре—ноябре у прибрежных участков и устьев рек, а исчезает он обычно только в июне. Лды Охотского моря представляют значительное препятствие для судоходства. На некоторых участках они не менее опасны, чем в Арктике. Внушительные размеры и большие глубины моря создают условия для развития сильного волнения. Наиболее неспокойна южная часть. Жестокие шторма происходят здесь с ноября по март. Иногда они длит-

ся 7—10 дней. Высота волн в это время достигает 10—11 м.

Нефтяные загрязнения на шельфе Сахалина концентрировались только в узкой прибрежной полосе, в портовых акваториях. Космический мониторинг также не обнаружил каких-либо выделений нефти в районах ее добычи. Анализ радиолокационных изображений показал, что наиболее часто пленочные загрязнения акватории регистрировались в заливе Анива у восточного побережья — от мыса Терпения до залива Чайво, эпизодически они наблюдались в Татарском проливе и у западного побережья, между городами Невельском и Углегорском. Большинство нефтяных пленок группировалось около судоходных трасс, ведущих к портам Корсаков (залив Анива) и Холмск (Татарский пролив). Отметим, что на месторождениях «Сахалин-1» и «Сахалин-2» фиксировались самые низкие из известных в мировой практике потери нефти [3]. Аварийные поступления при операциях на платформе «Молипак» составили всего 3×10^{-6} % от объема добычи, что на порядок ниже среднего показателя, приведенного в материалах мировой статистики.

Баренцево и Карское моря. В северных районах России преобладающее углеводородное сырье — газоконденсат с повышенной (по сравнению с нефтью) растворимостью в воде. Это усиливает вероятность поступления углеводородов в поверхностные и подземные воды. Потенциальными источниками таких загрязнений служат системы приготовления и циркуляции буровых растворов и жидких химических реагентов, а также блоки хранения сыпучих и горюче-смазочных материалов. Загрязнение вод может произойти и при испытании эксплуатационной колонны на герметичность, при демонтаже оборудования и др. В акваториях с суровым ледовым режимом, к которым относятся практически все месторождения Баренцева и Карского морей, существует и риск разрушения платформ ледовым полем.

Приразломное — первое месторождение на шельфе Западной Арктики, где, несмотря на то, что Печорское море большую часть времени по-



Платформа «Приразломная» и ее положение в Печорском море.

крыто льдом, предполагается проводить промышленную добычу нефти круглый год. Своевременный вывоз продукции обеспечат нефтеналивные танкеры усиленного ледового класса с двойным корпусом и дедвейтом (массой груза) 70 тыс. т — «Михаил Ульянов» и «Кирилл Лавров». Они созданы специально для транспортировки нефти с платформы «Приразломная» на рынки сбыта. Газпромом предприняты конструктивные меры, необходимые для уменьшения воздействия платформы на окружающую среду и снижения производственных рисков.

Конечно, освоение месторождений в Арктике — технически более сложная задача, чем в любом другом регионе. Тем не менее, благодаря развитию технологий, сохранению высоких цен на нефть и резкому таянию льдов добыча топлива становится здесь весьма перспективной. В частно-

сти, Норвегия, например, активно добывает нефть на шельфах Норвежского и Северного морей и отправляет ее потребителям морским и наземным путем. Морская служба этой страны ведет круглосуточное наблюдение у своих берегов и за год отслеживает 500—600 незначительных аварийных разливов, которые быстро ликвидируются.

Прогресс невозможно остановить. Добывать нефть в Арктике диктует насущная необходимость в топливе. Потому так много сил тратят арктические государства на расширение своих границ в Северном Ледовитом океане, где сосредоточены общемировые запасы углеводородов. Наша страна обладает достаточным опытом добычи нефти в ледовых условиях, и не совсем понятна озабоченность иностранных организаций эксплуатацией платформы «Приразломная» в Баренцевом море. ■

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 14-05-00223.

Литература

1. Воробьев Ю.Л. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. М., 2007.
2. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М., 2011.
3. Патин С.А. Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. М., 2008.
4. Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М., 2013.
5. NAS (National Academy of Sciences). Oil in the Sea III // Fates and effects. National Research Council. Washington, 2003.
6. AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Chapter 4. Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the Arctic. Oslo, 2007.
7. Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. II. Море / Отв. ред. В.В.Сивкова. Калининград, 2012.

Атмосферные осадки над городами и регионами России

П.Ф.Свистов, А.И.Полищук

В крупных городах и промышленных центрах уже давно не выпадают естественные чистые атмосферные осадки. Дождь и снег несут в себе частицы самых разных химических элементов, в том числе опасных для человека. Атмосферная влага всего за 8–10 сут впитывает все, что выбросил большой город, и в определенный момент продукты антропогенной деятельности в виде сульфатов, нитратов и растворенного в воде аммиака проливаются на землю.

Данные о химическом составе осадков в различных регионах России публикуются уже более 50 лет. В нашей стране существует сеть специализированных станций, на которых регулярно отбираются пробы, и несколько лабораторий, где определяются кислотность, электропроводность и общее содержание макро- и микроэлементов в дождевой воде. Попытаемся разобраться, что же именно несут в себе дождь и снег в разных регионах и насколько они опасны.

Фоновые значения

Атмосферные осадки всегда имеют фиксированный нижний уровень минерализации, который определяется содержанием



Петр Филиппович Свистов, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела мониторинга и исследований химического состава атмосферы Главной геофизической обсерватории им.А.И.Воейкова (Санкт-Петербург), химик-аналитик. Многие годы занимается химической географией атмосферных вод.



Алла Ильинична Полищук, кандидат физико-математических наук, начальник информационно-аналитического центра той же обсерватории. Область научных интересов — мониторинг загрязнения атмосферы.

в воздухе углекислого газа. Чистая равновесная (находящаяся в равновесии с окружающим воздухом) вода при температуре 20°C имеет электропроводность около 1 мкСм/см, а ее минерализация (сумма ионов) составляет 0.5 мг/л. Растворенные в воде природные газы и аэрозоли доводят минерализацию осадков до 3 мг/л, а величину рН — до 5.6. По существу эти величины — климатические постоянные, т.е. устойчивые, консервативные характеристики состояния среды. Их можно считать *глобальным фоном* минерализации и кислотности атмосферных осадков. Повторяемость осадков с такими показателями в континентальной России не превышает 1%.

Изменение фоновых характеристик естественных осадков может происходить лишь в результате продолжительного воздействия природных и антропогенных факторов. В свою очередь оно способно влиять на развитие долгопериодных процессов в атмосфере, приводящих к климатическим эффектам. Изучением глобального фона минерализации и кислотности осадков занимается

международная сеть фонового мониторинга, в состав которой входят девять станций Российской Федерации.

Существует и *региональный фон*. Это характеристики осадков над конкретной территорией, они напрямую зависят от физико-географических условий и могут часто меняться в пространстве и времени под влиянием, например, циркуляционных процессов.

Каждое измеренное значение содержания примесей в осадках складывается из фоновой и добавочной частей. И именно добавочная концентрация, которая может значительно превышать фоновую, определяет большую изменчивость общего содержания различных примесей в дожде и снеге.

Урбанизированные осадки

Загрязненные (техногенные) осадки несут невероятное количество химических элементов, многие из которых опасны для всего живого (рис.1). В результате химических реакций почвы и воды обедняются полезными компонентами и обогащаются вредными. Деревья теряют часть листьев, становятся беззащитными против болезней, а их корни замедляют развитие из-за нехватки питательных веществ. Увеличение кислотности приводит к задержке в развитии или гибели водных и почвенных животных, растений и микроорганизмов. Кислотные дожди ускоряют коррозию строительных материалов и красок, разрушают здания и строения, в том числе объекты культурного наследия. Болезнетворные вирусы, попавшие в осадки, ухудшают санитарно-гигиеническое состояние окружающей среды.

Для определения химических показателей техногенных осадков используются данные наблюдений со станций, расположенных на урбанизированных территориях. К ним можно отнести все административные центры Российской Федерации, а также крупные населенные пункты и промышленные центры. Минерализация осадков в них обычно превышает 15 мг/л (а их проводимость выше 30 мкСм/см).

Доля осадков с минерализацией менее 15 мг/л в России составляет сегодня 40–45%, в 1995 г. этот показатель находился на уровне 23%, в годы перестройки достигал примерно 31%, а в 2005 г. приблизился к 50% (рис.2).

Около 30% станций на урбанизированных территориях России регистрируют в осадках

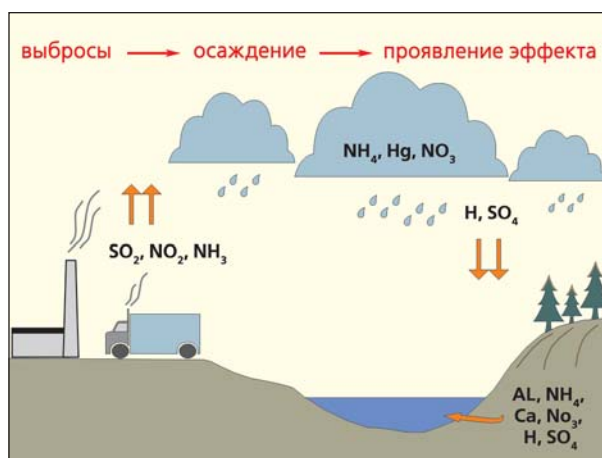


Рис.1. Загрязнение ландшафтов вблизи источника выбросов.

хотя бы один компонент, величина которого максимальна для региона и превышает среднее многолетнее значение примерно в три раза. К ним относятся и станции, фиксирующие среднюю за месяц (или неделю) величину $\text{pH} \leq 5.0$.

На европейской территории России в эту группу входит большинство станций Кольского п-ова — по причине высокого закисления осадков. В центральных областях — Брянск и Калач с максимальными концентрациями аммония (8.1 мг/л) и кальция (14.7 мг/л) соответственно, а также Липецк — с наиболее высоким в регионе содержанием калия. В Западной Сибири по многим компонентам лидирует Норильск. Концентрация сульфатов в осадках здесь может достигать 71.6 мг/л, кальция — 10.8 мг/л, магния — 22.6 мг/л*, а сумма

* Это редкий случай, когда концентрация магния в осадках выше, чем кальция.

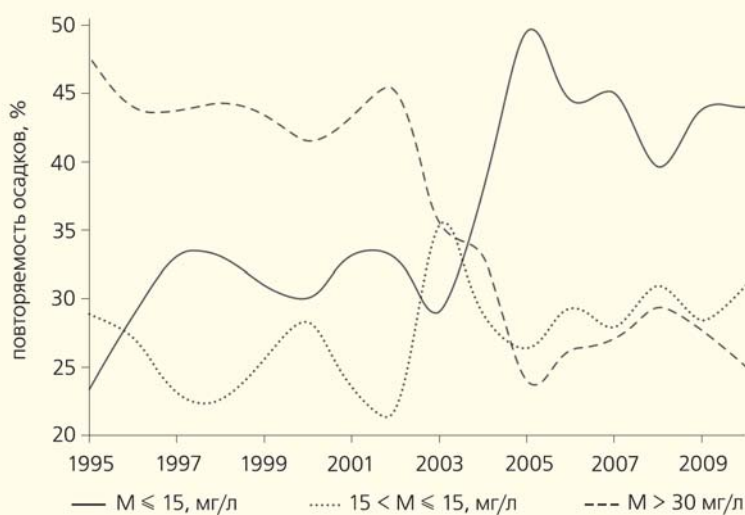


Рис.2. Повторяемость осадков с разной минерализацией в среднем по России.

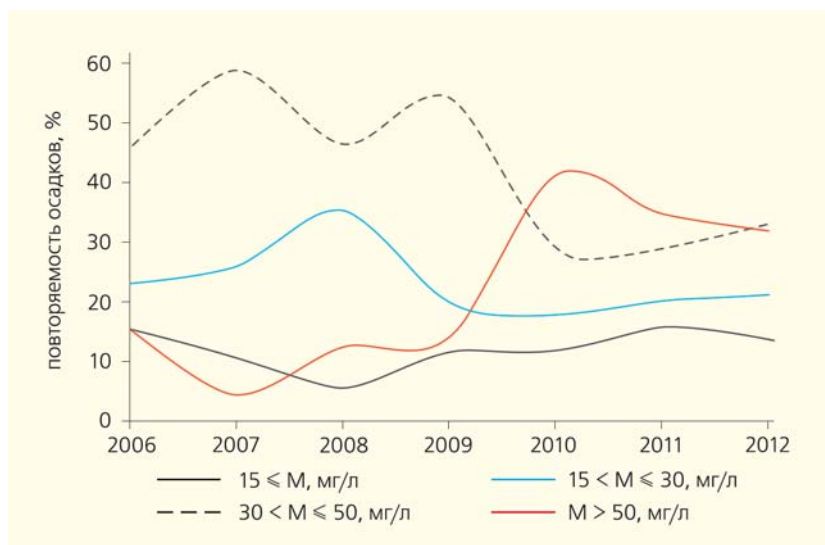


Рис.3. Повторяемость осадков с разной минерализацией на урбанизированных территориях России.

ионов в отдельных выпадениях близка к 500 мг/л. В Диксоне преобладают хлориды (48.9 мг/л), Искитим (Новосибирская обл.) отличается высоким содержанием гидрокарбонатов (104.8 мг/л) и значениями минерализации (139.2 мг/л), в Славгороде максимальна величина pH (8.0). По всему Приморью на Дальнем Востоке выпадают умеренно кислые осадки.

По сумме ионов (M) в атмосферных осадках урбанизированные территории европейской части России разделены на группы: $M \leq 15$, $15 < M \leq 30$, $30 < M \leq 50$ и $M < 50$ мг/л. Но лишь внутри последних двух происходят заметные колебания минерализации (рис.3). В сильно загрязненных городах вероятность выпадения относительно чистых осадков с минимальной суммой ионов ($M \leq 15$ мг/л) не превышает 15%. Эту величину можно принять за региональный фон, который с 2008 г.

имеет слабую тенденцию к возрастанию. Повторяемость осадков с повышенным загрязнением ($30 \leq M \leq 50$ и $M > 50$ мг/л) близка к 65%.

Проводимость

Одна из важных функций атмосферных осадков — очищение атмосферы от вредных газов и аэрозолей. Оно становится очевидным при сравнении влажных выпадений веществ из воздуха с их выбросами в атмосферу (рис.4).

Сегодня огромные средства тратятся на оценку эффективности методов снижения антропогенных выбросов. Однако выполнить ее можно практически без затрат — анализируя изменение

проводимости осадков (рис.5), ведь она напрямую зависит от суммы ионов в них (и в том числе от их кислотности). Так, в большинстве городов России, отнесенных по степени загрязнения воздуха к неблагоприятным, выпадают осадки с повышенной проводимостью. Измеряя этот показатель, можно отслеживать изменения загрязнения атмосферы.

Если в растворе величина $pH \geq 5.0$, то минерализация осадков M (мг/л) в среднем по России связана с удельной электропроводностью k (мкСм/см) соотношением: $M = 0.6k \pm b$, где величина коэффициента и знаки различаются в зависимости от места сбора осадков. Другими словами, сумма ионов близка к половине проводимости осадков (чем разбавленнее раствор, тем точнее). В одном из самых неблагоприятных в России городов — Норильске — проводимость k определяется следую-

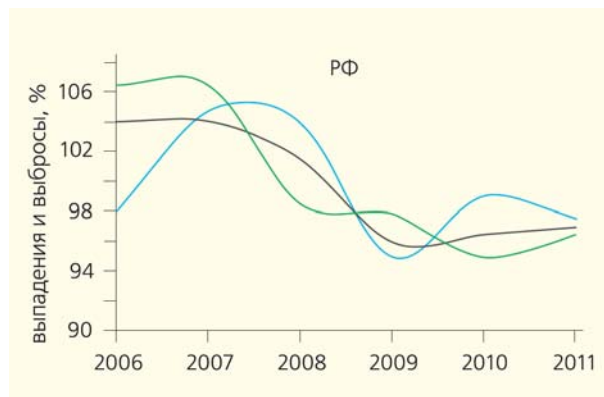
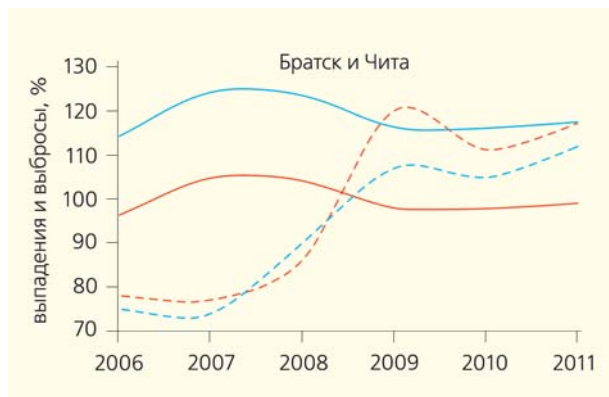


Рис.4. Соотношение среднегодовых выбросов загрязняющих веществ (красные кривые) и их выпадений с осадками (синие кривые) в городах Братске (сплошная линия) и Чите (пунктирная линия) и по России в целом. Зеленым показаны выбросы от автотранспорта, черным — от стационарных источников [1].

щим уравнением: $k = 2.1M - 15.5$. Здесь каждые три года загрязнение осадков и, по-видимому, воздуха уменьшается примерно в 1.5 раза, то есть с 2006 по 2012 г. оно снизилось в 8–10 раз.

Обращаем внимание на свободный член b , который указывает на отсутствие в Норильске осадков с низкой минерализацией. За семь лет средняя за год сумма ионов здесь изменилась с 220 до 100 мг/л. А в Архангельске, например, общее загрязнение осадков значительно меньше и колеблется в пределах 10–14 мг/л. В Новосибирске минерализация сначала уменьшилась с 21 до 10 мг/л, затем снова возросла до 23 мг/л.

Экологической нормой предложено считать значение проводимости осадков 60 мкСм/см (примерно соответствующее минерализации 30 мг/л). В случае его превышения осадки следует относить к промышленно загрязненным.

Сера в осадках и в воздухе

Логично ожидать, что качественный и количественный состав осадков в городах зависит от содержания ионов, газовых компонентов и аэрозолей в воздухе. Посмотрим на содержание, к примеру, диоксида серы в воздухе и сульфатов в атмосферных осадках Санкт-Петербурга (рис.6). Вопреки ожиданиям, их связь сложно назвать тесной. Так, начиная с 2008 г. содержание сульфатов стабилизировалось (как результат повсеместного использования природного газа), а концентрация сернистого газа продолжает снижаться.

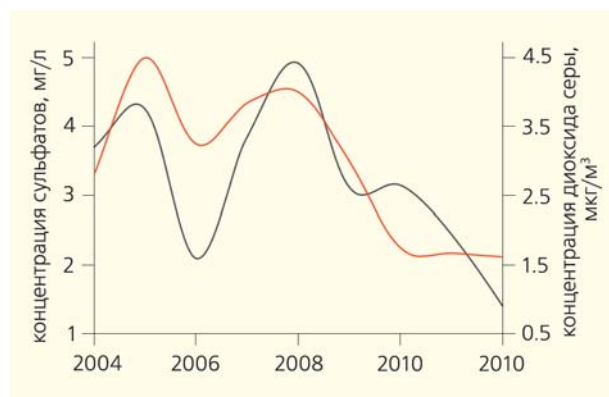


Рис.6. Изменение содержания сульфатов в атмосферных осадках (красная кривая) и диоксида серы (черная кривая) в воздухе Санкт-Петербурга [2].

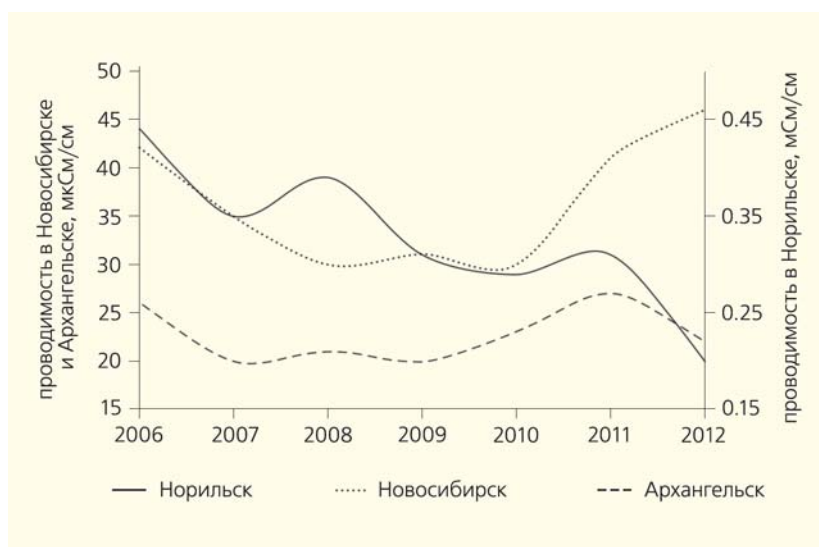


Рис.5. Изменения проводимости осадков в Норильске, Новосибирске и Архангельске [1].

По данным о содержании сульфатов в осадках несложно оценить полуколичественно концентрацию диоксида серы в свободной атмосфере.

В период выпадения осадков большая часть серы присутствует в виде сульфитов (SO_3^{2-}). Постепенно сульфиты и гидросульфиты переходят в сульфаты. Для облачных капель предложено выражение [3]:

$$C_0 = (K_1 K_N P_{\text{SO}_2})^{0.5} \text{ и далее } P = C_0^2 / K_1 K_N = C_0^2 / 0.0164,$$

где C_0 — концентрация сульфита (сульфата) в воде (моль/л), K_1 и K_N — постоянные равновесия, $K_1 = 0.0132$ и $K_N = 1.242$ моль/л·атм (моль на литр при давлении газа в одну атмосферу), P_{SO_2} или P — парциальное давление диоксида серы (атм).

При максимальной фоновой минерализации осадков 3 мг/л средняя минимальная концентрация сульфатов над континентами близка к 0.5 мг/л, чему соответствуют значения концентрации диоксида серы в облаках около 1.4 мкг/м³.

В 2006 г. максимальное содержание сульфатов в Центральном федеральном округе достигало 37.5 мг/л, что в пересчете на SO_2 в воздухе близко к 105 мкг/м³. Среднесуточная предельно допустимая концентрация (ПДК) сернистого газа в России составляет 50 мкг/м³. При содержании его около 30 мкг/м³ усиливаются листопад и коррозия металлов. Хроническое поражение растительности происходит при концентрации SO_2 больше 80 мкг/м³.

Загрязнение осадков аммиаком

В урбанизированных осадках могут присутствовать вещества, приводящие к изменению гидрохимического и гидробиологического режима поверхностных вод суши. К ним относят нитриты,

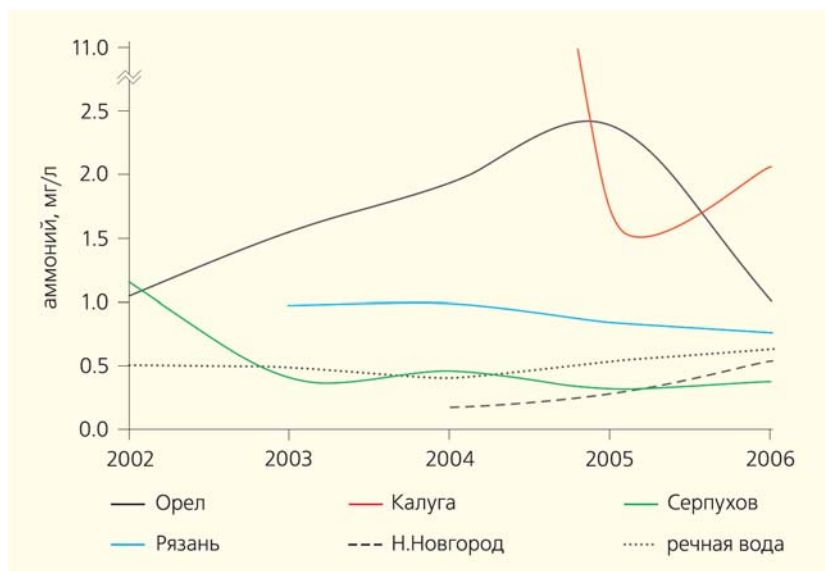


Рис.7. Изменение концентрации аммония в осадках в городах бассейна р.Оки и в речной воде [8].

пестициды, тяжелые металлы, а также аммиак. Превышение их ПДК часто становится смертельным для водных обитателей [4–7].

Измерения проводились в различных городах бассейна р.Оки (рис.7). Примерно в 9 случаях из 10 аммония (NH_4^+) в осадках содержалось на 80% больше, чем в реке. Если же в речной воде аммония было больше, чем в дождевой, их концентрации всегда оставались очень близкими.

Отмечаются случаи, когда синхронно экстремальным концентрациям аммония в осадках соответствуют максимальные либо минимальные значения в речной воде. Коэффициент корреляции между содержанием аммония в осадках и в водоемах составляет примерно 0.5. Следовательно, примерно 25% аммония в речной воде обеспечивается атмосферными осадками. В более чем 50% случаев концентрация аммония в осадках, выпадающих в бассейне Оки, превышает предельно допустимую (если принять ее равной 0.5 мг/л) в несколько раз (до 10).

Кислотность

Пожалуй, к самым удивительным и непредсказуемым свойствам атмосферных осадков следует отнести их кислотность. Она представляет собой концентрацию ионов водорода $[\text{H}^+]$ в водном растворе (в молях на литр или микрограммах на литр). Показателем кислотности служит величина рН, которая выражается как $\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$. Диапазон когда-либо измеренных концентраций $[\text{H}^+]$ в осадках на Земле колеблется от 0.00316 мкг/л ($\text{pH} = 8.5$) до 10000 мкг/л ($\text{pH} = 2.0$). Следовательно, когда кислотность возрастает, величина рН

уменьшается. Часто саму величину рН называют кислотностью, подразумевая, что низкие значения ($\text{pH} < 7.0$) соответствуют кислым растворам, а высокие ($\text{pH} > 7.0$) — щелочным. Но в экологической литературе можно встретить и такое, к примеру, выражение: «кислотность раствора при величине $\text{pH} \geq 8.0$ ». Это верно, поскольку любые водные растворы содержат ионы водорода.

В естественных условиях состояние атмосферы регулируется диоксидом углерода, который поддерживает величину рН осадков на уровне 5.6 ± 0.1 . В прошлые эпохи содержание CO_2 в воздухе достигало 0.3%, и это могло привести к выпадению атмосферных осадков с $\text{pH} \leq 5$.

Рассмотрим особенности колебаний кислотности осадков

на примере данных метеостанции Воейково, расположенной в 15 км восточнее Санкт-Петербурга (рис.8).

Средняя многолетняя величина рН в период с 1990 по 2010 г. составила 5.6. По сравнению с предыдущим двадцатилетием она возросла на 0.2. Размах величины рН по месяцам колеблется от 4.6 до 7.0. Можно заметить, что всплески щелочности осадков (повышение рН) чаще всего приходятся на середину лета, когда воздух особенно запылен. Зимой под влиянием газовых компонентов (диоксида серы, азота и аммиака) рН понижается, а кислотность осадков возрастает.

Другие элементы, содержащиеся в осадках и влияющие на рН, укладываются в диапазоны регионального фона при средней сумме ионов, не превышающей 15 мг/л. Среднегодовая минерализация осадков в Воейково находится в интервале от 6.5 до 12 мг/л. Абсолютный минимум близок к 2 мг/л, а максимум составил 35.5 мг/л. Минерализацию определяют три компонента: сульфаты, гидрокарбонаты и нитраты, которые вместе составляют около 60%. Содержание так называемой морской составляющей (хлорида натрия) не превышает 10%.

Путем умножения концентрации компонента на сумму осадков определяют его количество, выпавшее на единицу площади за фиксированное время (влажное выпадение). Влажное выпадение широко используют для расчета нагрузок на окружающую среду. Для Воейкова эти выпадения в среднем составляют 7–10 т/км² в год. Характерно, что соотношение в осадках между серой и азотом менялось после перевода энергетики и промышленности на газовое топливо. В Санкт-Петербурге суммарного азота (нитратного и ам-

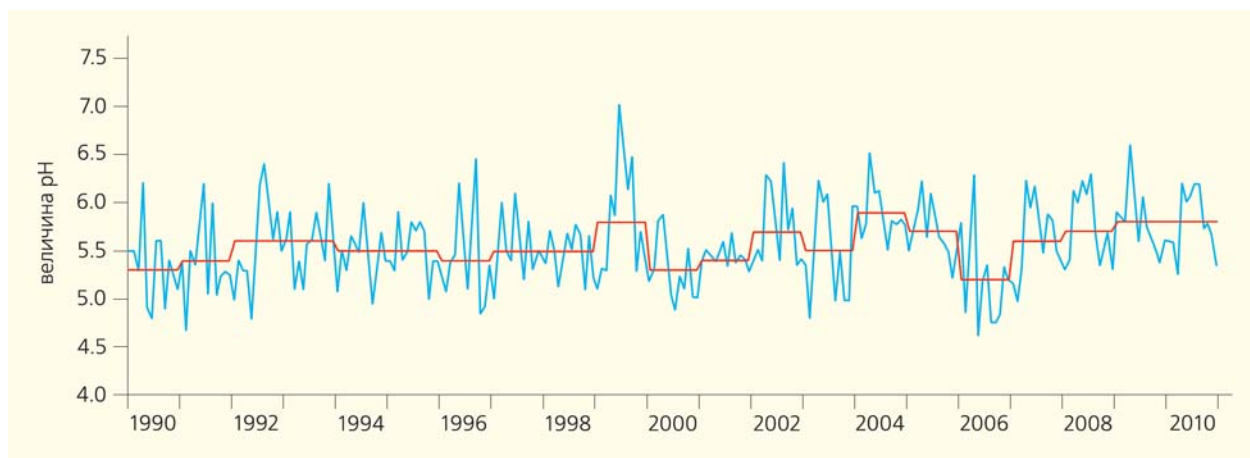


Рис.8. Изменения среднемесячных (синяя кривая) и среднегодовых (красная кривая) значений pH атмосферных осадков по данным метеостанции Воейково.

миачного) стало выпадать больше, чем серы, причем, как ни странно, азота аммиачного — в два раза больше нитратного. Наибольшим колебаниям подвержены выпадения гидрокарбонатов, тесно связанных с запыленностью воздуха, содержанием углекислого газа и кислотностью осадков.

Поскольку среднегодовая кислотность осадков (в отличие от других показателей) со временем меняется слабо, актуальной сегодня остается карта пространственного распределения этой величины, выполненная в 1996 г. (рис.9).

Но анализ недельных или суточных проб осадков показывает, что именно единичные выпадения представляют наибольшую опасность.

Известно, например, что массовая гибель рыбы в норвежских реках была вызвана закислением воды [5, 7]. Из-за неожиданно наступившей оттепели, дождей и таяния снега на склонах гор величина pH речной воды понизилась до 3.9–4.2 (т.е. кислотность возросла до 120 мкг/л).

Закисление воды приводит к увеличению ее прозрачности, так как количество и разнообразие

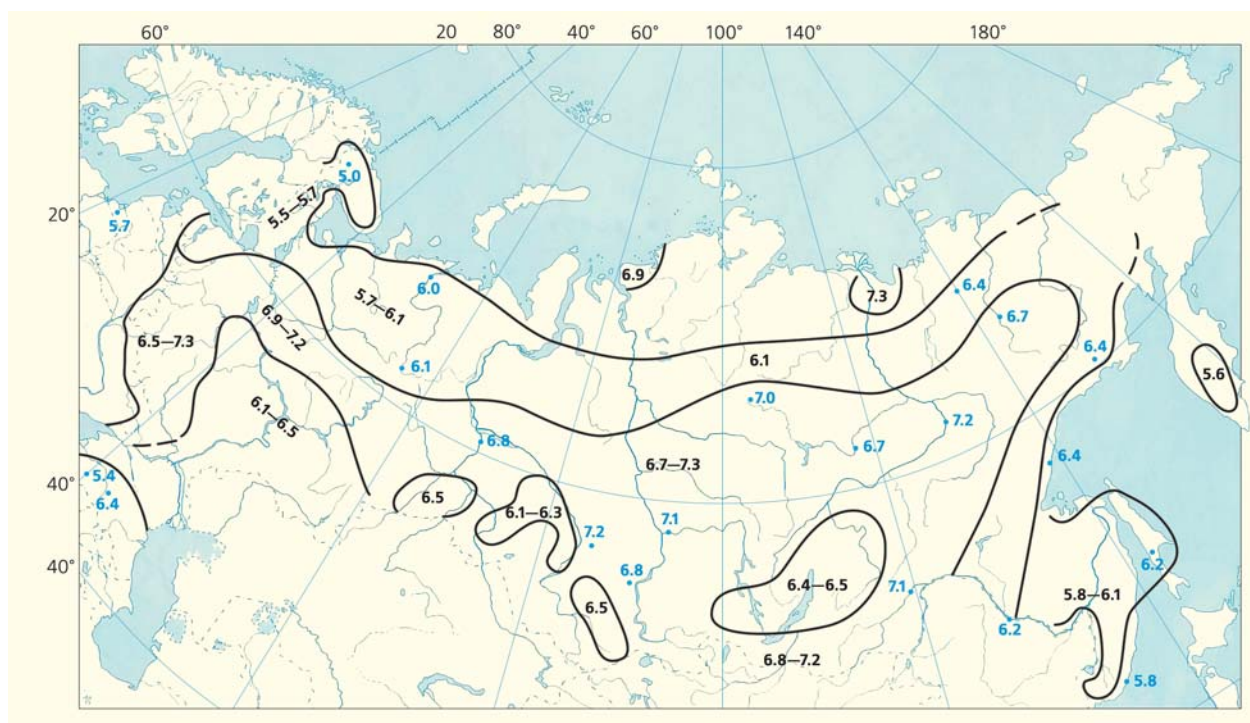


Рис.9. Распределение среднегодовых значений pH в атмосферных осадках в 1994—1996 гг. Цифрами показаны величины pH в регионе, цифрами с точкой — на конкретной станции [9].

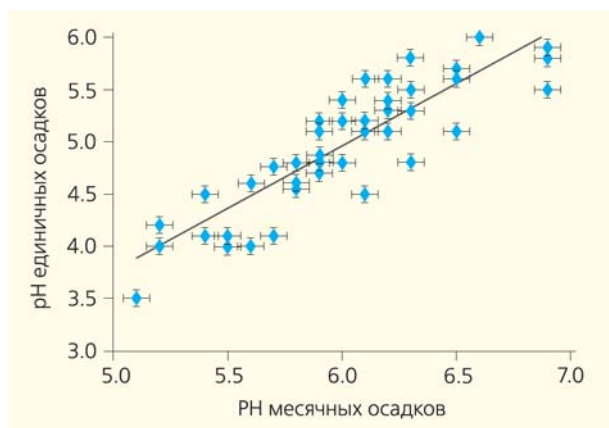


Рис.10. Зависимость между величиной pH в месячных и единичных осадках.

зоо- и фитопланктона снижаются, а взвешенные частицы оседают. Параллельно снижается содержание фосфатов и кальция, возрастает концентрация сульфатов. Это отражается на многих видах рыб и беспозвоночных. Моллюски и ракообразные крайне чувствительны к малейшему закислению воды: величина pH = 6.0 предельна, а 5.0–5.2 — опасна для их жизнедеятельности. Если pH длительное время не поднимается выше 6.0, в воде исчезают ракообразные и даже отмечается гибель рыб. Но заморы у разных видов рыб (и даже в пределах одного вида) случаются при разных значениях кислотности. Поэтому остаются вопросы. Например, влияет ли ионный состав атмосферных осадков на их токсичность? Каково совместное действие высоких концентраций иона водорода и каких-либо других веществ, загрязняющих воду? При значениях pH < 5 гибель организмов наблюдается и в воде с высоким содержанием ионов. Имеются данные о том, что негативное влияние некоторых ионов и токсичность солей аммония увеличиваются при возрастании кислотности среды. Еще отмечено, что максимумы нитратов, аммония и величины pH в речной воде и осадках часто приходится на осенне-зимний период.

Установлено, что повышенная кислотность представляет особую опасность в момент выпадения осадков, а сравнительно небольшое закисле-

ние — при длительном воздействии [4–7]. Поэтому принятое в международной практике осреднение значений кислотности за месяц нельзя считать корректным. Требуется внесение поправок. Например, для отдельной станции или региона можно получить экспериментальную зависимость величины pH месячных осадков от кислотности отдельных выпадений (рис.10). В свежеснеживших осадках по мере хранения кислотность уменьшается (возрастает pH) примерно по экспоненте. Так, при равновесном значении pH месячных осадков 5.6 единичные выпадения могут находиться в интервале pH от 4.0 до 4.6.

По результатам сетевых и экспедиционных измерений кислотности в нашей обсерватории и с учетом литературных данных можно предложить способ качественной оценки состояния окружающей среды по величине pH атмосферных осадков (табл.1)*. К такому предложению имеются веские основания, поскольку экспериментально установлено, что химический состав осадков примерно на 70% определяется той природной зоной, где они выпадают. Назовем условно кислотность осадков от 0.1 до 10 мкг/л (pH = 7–5) естественным состоянием среды (экологическим фоном). Это и другие значения — выше или ниже — выразим в баллах, которые будут характеризовать отклики и возможные отклонения в биоценозах и их толерантность (сопротивляемость). Стоит отметить, что все градации экологических зон относятся к обычному, комфортному в понимании человека, состоянию флоры и фауны. Хотя, скажем, для болотных экосистем дождь с величиной pH = 3.5 будет вполне безопасным.

Супертоксиканты

Хлорорганические пестициды (ХОП), такие как дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и гексахлорциклогексан (ГХЦГ), представитель семейства полициклических ароматических углеводородов

* Авторы признательны за высоко профессиональный подход к анализу химического состава атмосферных осадков химикам-аналитикам Н.А.Першиной, М.Т.Павловой, Т.А.Соколовой и И.Д.Павловой.

Таблица 1

Оценка качества среды по данным о кислотности осадков [5, 7, 10]

Баллы	0	1	2	3	4	5
Величина pH	5.5–6.5	5.5–5.0	5.0–4.5	4.5–4.0	4.0–3.5	<3.5
Возможные изменения флоры и фауны	отсутствуют	слабые	угнетение роста	угнетение роста и гибель	гибель	гибель
Экологические зоны	экологический фон (норма)	зона риска	зона кризиса	зона экологического бедствия		

(ПАУ) бенз(а)пирен, а также тяжелые металлы (свинец и кадмий) относятся к супертоксикантам. Они попадают на поверхность земли как с влажными, так и с сухими выпадениями. Большинство этих соединений (особенно ХОП) отличается стойкостью к воздействию различных факторов окружающей среды (температуры, солнечной радиации, влаги и др.).

Кроме того, их концентрации нарастают в последующих звеньях биологической цепи. Так, содержание тяжелых металлов и ДДТ в гидробионтах может превышать концентрацию их в воде на один-два порядка.

ПДК свинца в воде составляет 10 мкг/л, кадмия — 1 мкг/л, различного вида пестицидов — 50 нг/л. Предельные значения концентраций тяжелых металлов периодически достигаются в осадках и водоемах заповедников Центрального федерального округа России (табл.2). Следовательно, при вполне приемлемом содержании основных компонентов и величины рН в осадках существует вероятность получить отравление, скажем, при дожде. Любая открытая поверхность при омывании дождем легко сорбирует радиоак-

Таблица 2

Содержание супертоксикантов в сопряженных средах [11]

	ГХЦГ, нг/л	ДДТ, нг/л	ПАУ, нг/л	Pb, мкг/л	Cd, мкг/л
Приокско-Террасный биосферный заповедник					
Осадки	54	77	7–12	1–15	0,1–6
Вода	41	47	3–7	0,1–5	0,05–1
Центрально-Лесной биосферный заповедник					
Осадки	7	49	1–8	2–10	0,1–3
Вода	7	57	4–5	0,2–4	0,01–1

тивные изотопы, тяжелые металлы и органические вещества, плохо растворимые в воде.

Региональное распределение загрязнений

В ряде городов Центрального федерального округа ведутся наблюдения за минерализацией осадков и содержанием в них сульфатов (рис.11). Каждая оконтуренная ломаной кривой площадь на рисунке составляет 100%, поэтому изменение содержания сульфатов и суммы ионов в любом городе мгновенно сказывается на ее форме. Преобладание компонента в сумме ионов приводит к совпадению профиля площадей. Примерно в 70% случаев в осадках преобладают сульфаты

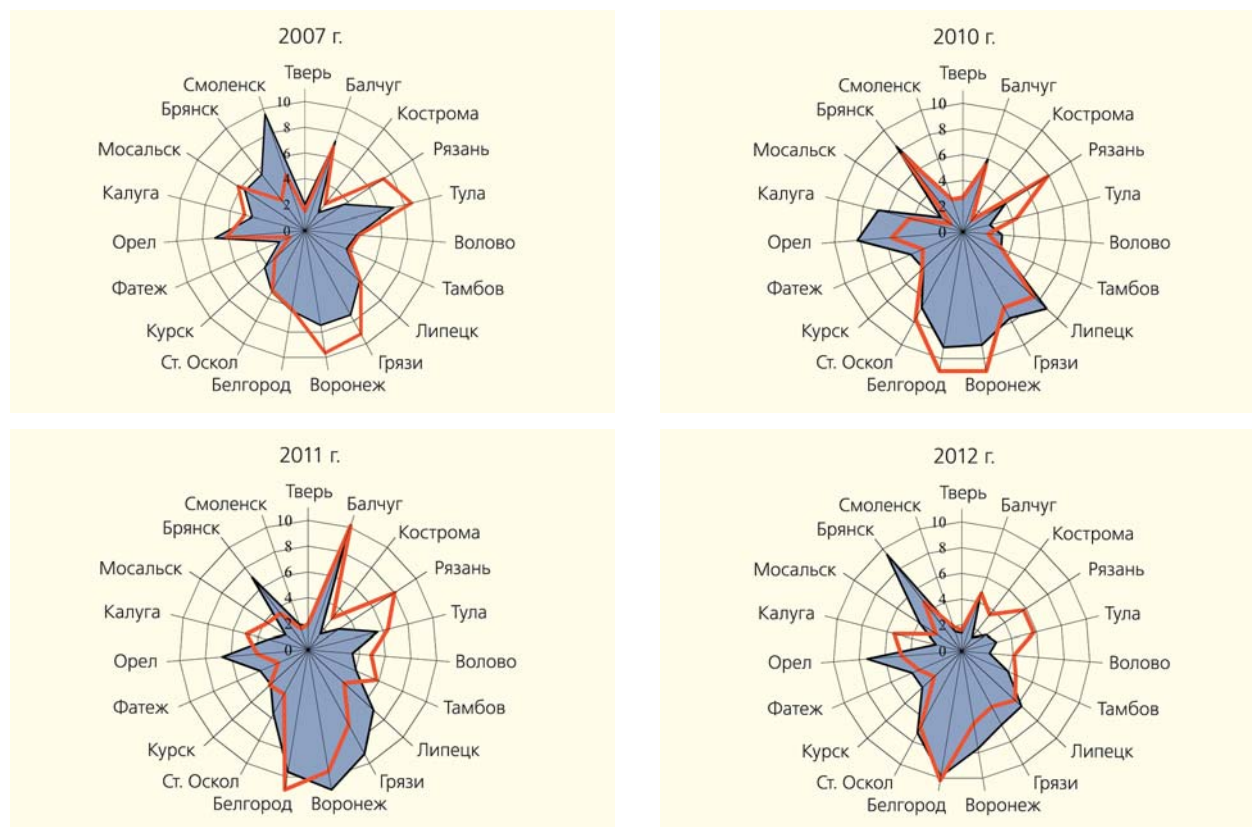


Рис.11. Процентное распределение суммы ионов (затененные площади) и концентрации сульфатов (красные кривые) в атмосферных осадках в городах Центрального федерального округа в разные годы.

и в 30% — гидрокарбонаты, что говорит о загрязнении воздуха диоксидом серы и пылью, содержащей карбонаты. В большинстве городов минерализация осадков с годами снижается или остается постоянной. Следовательно, изменения формы ломаных кривых на рисунке в большинстве случаев связаны с понижением или перераспределением загрязнений в осадках и в воздухе.

Распределение загрязнений внутри Центрального округа и за его пределами зависит от режима циркуляции воздуха. В течение года территория находится преимущественно под влиянием воздушных масс умеренных широт (континентальных или морских). Они приходят с западо-юго-запада, реже с востоко-юго-востока. И именно в секторе между этими направлениями расположены наиболее загрязненные города.

Средние за год выпадения минеральных веществ в Центральном Черноземье при годовой сумме осадков около 610 мм составляют 10.7 т/км². (максимальные — до 20 т/км²). Фактическое распределение осадков и выпадений внутри года может значительно отличаться от среднего многолетнего. Наглядное представление о величинах внутригодовых колебаний можно получить, анализируя многолетние данные о суммах осадков. Они максимальны (840 мм) всего в 2% случаев, 800 мм выпадает в 5%, а 770 мм — в 10%. То же и с минимальными суммами: 415 мм наименее вероятны (5%), 445 мм выпадают чаще — в 10% случаев, а 490 мм — в 20%.

К Центральному округу примыкают Украина, Белоруссия и области РФ, в которых систематически анализируется химический состав городских осадков: Новгородская, Вологодская, Нижегородская, Пензенская, Саратовская и Ростовская, а также Республика Мордовия. Коэффициент линейной корреляции между среднемесячными значениями выпадений загрязняющих веществ с осадками в центре России и в прилегающих областях

не превышает 0.3. Связь отсутствует также и между количествами осадков. Это говорит о том, что, по-видимому, ведущую роль в формировании их минерализации играют местные источники.

Наибольшая минерализация осадков в 2007 г. (7.5—9.5%) наблюдалась в Смоленске, Воронеже и Грязях, чуть меньше она была в Балчуге, Туле, Орле, Белгороде и Липецке (около 7%). Заметим, что в Смоленске и Брянске распределение сульфатов заметно отличалось от распределения суммы ионов. В последующие годы максимум минерализации смещался в Липецк, Балчуг, Белгород, Брянск, оставаясь стабильно высоким в Воронеже. Можно предположить, что мероприятия по борьбе с загрязнением воздуха здесь малоэффективны.

При сопоставлении климатических и погодных характеристик с временным ходом выбранных компонентов можно отметить, что в 2007 г. значения минерализации в 30% случаев были обусловлены юго-западным, западным и северо-западным переносами (доля сульфатов составляла менее 20%). К 2012 г. резко проявилось загрязнение территории Черноземья с западного и северо-западного направлений. В настоящее время основной вклад обеспечивается городами, расположенными в южном и юго-восточном секторах (т.е. прохождением редкого в этих местах тропического воздуха).

Все природные и антропогенные источники загрязнений воздуха действуют непрерывно. Но при этом непрерывны и удаляющие их процессы. Это прежде всего вымывание атмосферными осадками, а также гравитационное оседание частиц, опускание нисходящими движениями воздуха и поглощение растениями. Теперь, на очередном этапе исследований, нам важно понять, достигается ли равновесие между поступлением веществ в атмосферу и их удалением. И не накапливаются ли вредные газы и аэрозоли в воздухе, которым все мы дышим? ■

Литература

1. Охрана окружающей среды в России. М., 2008; 2012.
2. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2011 году / Под ред. Д.А.Голубева. СПб., 2012.
3. Гетерогенная химия атмосферы / Под ред. Д.Р.Шрайера. Л., 1986. С.340—354.
4. *Okland J.* Distribution and ecology of the freshwater snails of Eforway // *Hydrology*. 1969. V.9. P.25—32.
5. *Jensen K., Snekvik E.* Low pH levels wipe out salmon and trout populations in southern Norway // *Ambio*. 1972. V.1. P.223—225.
6. *Rosseland B.O., Sevaldrud I., Svalastog D., Muniz I.P.* Studies on freshwater fish populations — effects of acidification on reproduction, population structure, growth and food selection // *Ecological Impact of Acid Precipitation* / Eds D.Drablos, A.Tollan. Oslo, 1980. P.336—337.
7. *Виноградов Г.А.* Процессы ионной регуляции у пресноводных рыб и беспозвоночных. М., 2000.
8. Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегодник 2004, 2007, 2010 и 2011 гг. М., 2006; Ростов-на-Дону, 2009; Ростов-на-Дону, 2012.
9. *Чистякова М.В., Першина Н.А., Павлова М.Т.* Химический состав атмосферных осадков // *Современные исследования Главной геофизической обсерватории к 150-летию со дня основания*. СПб., 2001. С.294—311.
10. *Ваганов П.А.* Как рассчитать риск угрозы здоровью из-за загрязнения окружающей среды. СПб., 2008.
11. *Майстренко В.Н., Хамитов Р.З., Будников Г.К.* Эколого-аналитический мониторинг супертоксикантов. М., 1996.

Прионы и амилоиды: ключевые свойства и роль в природе

В.В.Кушниров

Почти все инфекционные агенты, будь то вирусы, бактерии или простейшие, имеют геном в виде ДНК или РНК, определяющий жизненный цикл и «план захвата» организма-хозяина. Удивительным исключением из этого правила являются прионы — инфекционные агенты белковой природы, не имеющие какого-либо генома. Наиболее известные из прионных заболеваний — болезнь Крейтцфельдта-Якоба, синдром Герстманна-Штраусслера-Шейнкера, болезнь каннибалов куру («смеющаяся смерть»), а также бычья губчатая энцефалопатия («коровье бешенство») и скреппи («почесуха») овец. Все эти заболевания имеют нейродегенеративный характер, неизлечимы и приводят к смерти*.

Первые упоминания скреппи относятся к XVIII в., но причина прионных болезней была установлена лишь в 1982 г., когда американский исследователь Стенли Прузинер (S.B.Prusiner)**

* Подробнее см.: *Ройхель В.М.* Медленные болезни человека и животных, вызванные прионами // Природа. 2002. №2. С.14–20. — *Примеч. ред.*

** За открытие прионов и их белковой природы С.Прузинер получил в 1997 г. Нобелевскую премию. Подробнее см.: *Кушниров В.В., Тер-Аванесян М.Д.* Лауреаты Нобелевской премии 1997 года: по физиологии и медицине — С.Прузинер // Природа. 1998. №1. С.112–116. — *Примеч. ред.*



Виталий Владимирович Кушниров, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики Института биохимии имени А.Н.Баха РАН. Область научных интересов — механизмы возникновения и существования прионов и амилоидов, способы выявления и моделирование амилоидных заболеваний.

выделил инфекционный белок и предложил термин «прион» (англ. prion — анаграмма из слов *protein* и *infection*). Прузинер установил, что прион представляет собой структурно измененную форму белка, в норме присутствующего в клетках организма-хозяина [1]. Выявленный белок был обозначен PrP (англ. *prion protein*), а его патологическая форма PrP^{Sc} (Sc от англ. *scrapie* — скреппи). Инфекционность PrP^{Sc} связана с тем, что он способен, взаимодействуя с нормальным белком PrP, вызывать в нем структурную перестройку и превращать его в подобие себя. PrP^{Sc} не подвержен деградации, он накапливается в организме, в первую очередь в мозге, нарушая функцию и вызывая гибель нейронов. Поскольку PrP является собственным белком организма, прионные болезни не вызывают иммунного ответа. Работу с прионами осложняет и то, что они устойчивы к кипячению и обработке формалином.

Прионы дрожжей

Все прионные болезни млекопитающих связаны с превращением единственного белка — PrP [1]. Прионы были также обнаружены у низших эукариот, причем в значительно большем количестве. Сейчас прионные свойства выявлены у девяти белков дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* и у одного белка мицелиального гриба *Podospora anserina*. Правда, следует отметить, что эти прионы проявляют себя не как инфекционные агенты, а как генетические элементы с нестандартными свойствами. Дрожжи и грибы облада-

ют весьма прочной клеточной стенкой, предотвращающей проникновение какой-либо инфекции, и потому прионы могут передаваться лишь от родителей к потомкам, а также при скрещивании. Прионы низших эукариот в большинстве случаев не только не представляют существенного вреда для клеток хозяина, но и могут быть даже полезны.

У дрожжей лучше всего изучен так называемый детерминант $[PSI^+]$, соответствующий прионной форме белка Sup35, известного также как фактор терминации трансляции eRF3. Этот белок необходим для завершения синтеза белков (трансляции), которое происходит на некодирующих (нонсенс) кодонах. В результате мутаций внутри кодирующей области генов могут возникать преждевременные нонсенс-кодона, прерывающие синтез белка. $[PSI^+]$ снижает активность Sup35, что позволяет прочитывать полностью такие гены, не прерываясь на преждевременных нонсенс-кодонах. $[PSI^+]$ стал популярной моделью, давшей очень много для понимания общих свойств прионов.

Детерминант $[PSI^+]$ был обнаружен еще в 1965 г. Брайаном Коксом (B.S.Cox) [2]. Но объяснить природу этого белка удалось лишь в 1994 г. Риду Уикнеру (R.B.Wickner), который предположил, что $[PSI^+]$ отражает переход белка Sup35 в неактивную прионную форму [3]. Эта гипотеза вскоре подтвердилась. Мы и одновременно сотрудники лаборатории Сьюзан Линдквист (S.Lindquist) выяснили, что в клетках, содержащих $[PSI^+]$, белок Sup35 переходит в агрегированное состояние [4, 5], и эти агрегаты обладают характерным свойством прионов — способны переводить неагрегированный белок Sup35 из неприонных клеток $[PSI^-]$ в агрегированную форму [6].

Мономер или полимер?

Известны две модели прионного превращения, которые полагаются на различные представления о природе этой формы белков. Первая модель [7] пришла вместе с прионной концепцией для PrP, которая помогла связать загадочные детерминанты дрожжей с прионным явлением. В соответствии с этой моделью, известной как «гетеродимерная», прионная форма белка представляет собой мономер с измененной структурой, а превращение белка происходит в результате взаимодействия прионной и неприонной молекул, после чего две прионные молекулы отделяются друг от друга.

Альтернативная модель предполагает, что прион — это разновидность амилоида, т.е. нековалентно-связанный белковый полимер. Амилоидами называют фибриллярные белковые агрегаты с регулярной структурой, признаваемые причиной более 30 неизлечимых возрастных заболеваний, таких, например, как болезни Альц-

геймера и Паркинсона [8]. Амилоиды подобны прионам по двум ключевым свойствам. Во-первых, укладка белка в составе амилоида существенно изменена и образует характерную структуру, называемую кросс-бета, в которой полипептидные цепи перпендикулярны оси фибриллы, а образуемые ими бета-слои параллельны оси. Во-вторых, амилоид катализирует структурное превращение и полимеризацию нормальной мономерной формы соответствующего белка.

Нам стало ясно, что верна именно вторая модель. Гетеродимерная модель имеет существенные слабости. Она предполагает довольно неправдоподобные свойства белка PrP. Наличие у белка двух альтернативных укладок само по себе необычно, но еще труднее представить, что одна из этих укладок способна превращать другую в себе подобную. Кроме того, известно, что существуют штаммы приона с различными свойствами, а, значит, альтернативных самовоспроизводящихся укладок должно быть множество — и это уже совершенно непредставимо. Не менее трудно объяснить и разделение двух прионных молекул после превращения одной из них, при условии, что процесс не расходует энергию в виде АТФ или ГТФ. В полимерной же модели таких проблем нет: наличие различных самовоспроизводящихся укладок в составе полимера хорошо известно, а разделение молекул в ходе полимеризации не требуется.

Следует заметить, что под формальное определение приона попадает как минимум одно явление, не связанное с амилоидами. Так, дрожжевой прион [b] представляет собой вакуолярную протеазу B, которая синтезируется неактивной и активируется за счет удаления аминоконцевого пептида другой, активной, молекулой протеазы B. Затем наша молекула может активировать другие молекулы протеазы B, удаляя пептид, что, кстати, напоминает гетеродимерную модель [9].

Структура и размножение прионов

В поддержку полимерной модели для белка Sup35 Джон Гловер (J.R.Glover) и Сьюзан Линдквист показали, что *in vitro* белок Sup35 образует амилоидные фибриллы [10]. Для этого, как и для поддержания прионного состояния, необходим только небольшой аминоконцевой домен Sup35. Аналогичные результаты были получены и для другого прионного белка дрожжей, Ure2. В дальнейшем выяснилось, что прионогенный аминоконцевой домен образует стержень амилоида, к которому прикреплены прочие домены белка, вероятно, сохранившие свою исходную структуру (рис.1). Похожее строение имеют все прионы дрожжей.

Обратим внимание, что *in vitro* Sup35, как и другие подобные белки, самодостаточен для амилоидного превращения. Однако в клетках

дрожжей поддержание приона в ряду поколений требует действия специфического шаперона (англ. chaperone — сопровождать; белки, обеспечивающие правильное сворачивание полипептидных цепей белков) — Hsp104 [11]. Этот белок занимает особое место среди шаперонов: он извлекает белковые молекулы из агрегатов, образующихся в результате теплового шока. Парадоксальным образом к потере $[PSI^+]$ приводит не только отсутствие Hsp104, но и во многих случаях его избыток.

Мы предложили гипотезу, которая описывает размножение прионов дрожжей и одновременно разрешает парадокс Hsp104 [12]. Мы исходили из предположений, что прионные частицы Sup35 представляют собой амилоидные фибриллы, а шаперон Hsp104 распознает их, как агрегаты неправильно свернутого белка, и извлекает из них молекулы Sup35 (рис.2). Извлечение каждой молекулы из фибриллы должно разбивать ее на две части (при условии, что действие Hsp104 происходит не на краю фибриллы). При этом удваивается количество концов фибрилл, катализирующих прионное превращение, что ускоряет переход белка в прионное состояние. Таким образом, при действии Hsp104 фактически происходит удвоение приона, несмотря на то, что количество агрегированного Sup35 не возрастает. В отсутствие Hsp104 размножение приона не происходит (хотя прионное превращение продолжается), и он сравнительно быстро теряется из растущей популяции дрожжей.

Интересно отметить, что действие Hsp104, необходимое для размножения прионов, направлено на растворение белковых агрегатов и уничтожение приона. Если активность Hsp104 увеличить, то можно добиться того, что растворение прионных частиц будет происходить быстрее, чем их рост, и тогда прион будет потерян. И это действительно можно наблюдать при сверхпродукции Hsp104 для многих вариантов $[PSI^+]$.

В дальнейшем полимерная модель получила убедительные экспериментальные подтверждения. Выяснилось, что в $[PSI^+]$ клетках дрожжей большая часть Sup35 находится в виде амилоид-

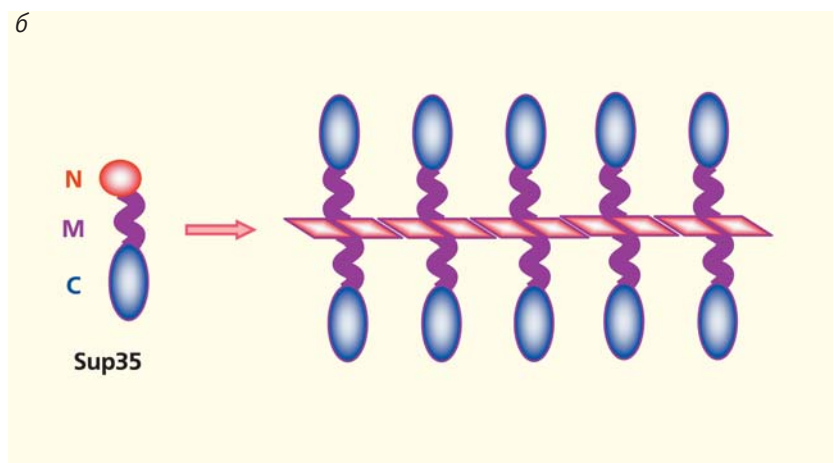
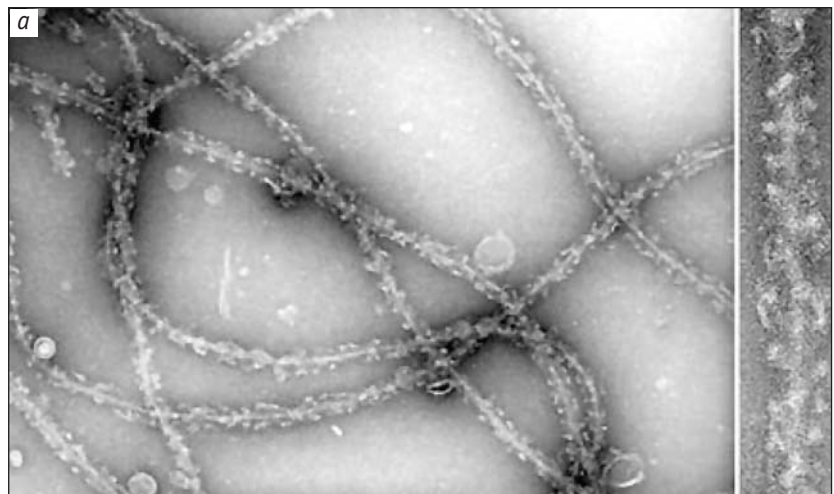


Рис.1. Фибриллы, образованные белком Sup35 (а) [10] и схематическая структура этих фибрилл и прионных частиц Sup35 (б). Белок Sup35 состоит из трех доменов: аминоконцевой (N) необходим для прионного превращения и образует стержень амилоида; карбоксиконцевой (C) выполняет жизненно важную функцию в терминеции трансляции, а средний домен (M) играет роль спейсера, соединяющего эти два домена.

ных полимеров, а не мономеров. Правда, эти полимеры многократно короче наблюдаемых *in vitro*, что, видимо, говорит об их фрагментации. Их размер составляет от 10 до 50 мономеров. Это значит, что их длина лишь ненамного превышает их толщину (~10 нм). Выяснилось также, что фрагментирующая активность зависит от Hsp104 [13].

Фрагментирующую активность Hsp104 можно ингибировать добавлением в среду гидрохлорида гуанидина (ГуГХ), и на этом основан довольно наглядный тест по определению количества прионных частиц в клетке. Одну клетку, содержащую $[PSI^+]$, выращивают в присутствии ГуГХ до образования маленькой колонии. Прионные частицы при этом не множатся, хоть и растут, и в ходе клеточных делений они случайно распределяются по отдельным клеткам, которые затем можно пере-

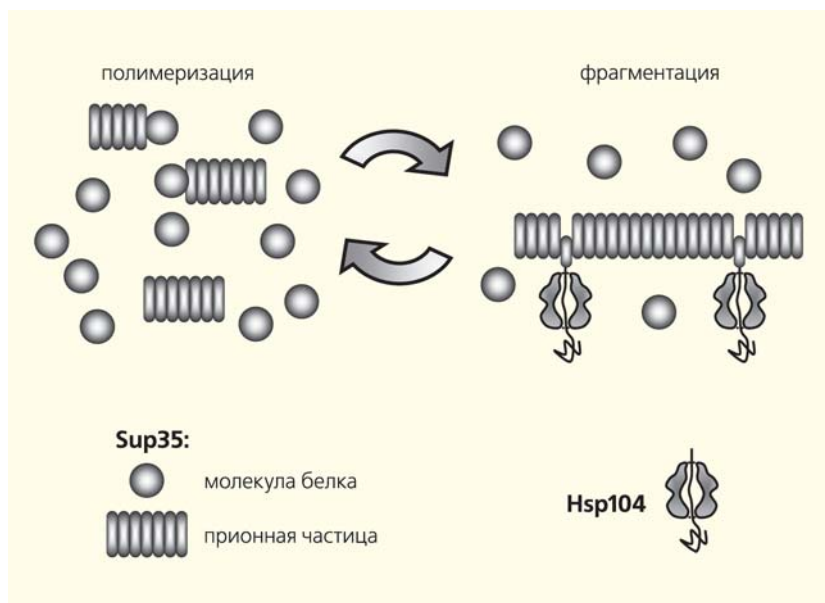


Рис.2. Цикл размножения приона дрожжей. Прионные частицы Sup35 растут, присоединяя к себе новые молекулы Sup35. Шаперон Hsp104 (гексамерная частица с каналом в центре, показано ее продольное сечение) случайным образом выдергивает молекулы Sup35 из прионной частицы (полимера), протягивая их через канал в виде развернутых полипептидных цепей. В результате прионная частица распадается на две части.

считать. Эту колонию рассеивают отдельными клетками на чашку Петри с низким содержанием аденина в питательной среде, где клетки, сохранившие прионные частицы, дают крупные белые $[PSI^+]$ колонии, а клетки без приона — мелкие красные $[PSI^-]$ колонии. Количество белых колоний приблизительно равно числу прионных частиц в исходной клетке. Оказалось, что $[PSI^+]$ клетки содержат в зависимости от варианта в $[PSI^+]$ от 100 до 1000 прионных частиц [14].

Для доказательства прионной концепции была разработана процедура трансформации клеток дрожжей амилоидными фибриллами. Выяснилось, что амилоиды Sup35, полученные *in vitro* из белка, продуцированного бактерией *Escherichia coli*, попадая в дрожжевую клетку, переводят Sup35 в прионное состояние. Кроме того, при разной температуре *in vitro* образуются фибриллы Sup35 с разной структурой. Оказалось, что при попадании в дрожжи эти фибриллы порождают фенотипически различные варианты $[PSI^+]$ [15]. Это говорит о зависимости фенотипа приона от структуры фибрилл.

На данный момент этот результат можно считать наиболее убедительным доказательством прионной концепции. Таким образом, было подтверждено, что:

— дрожжевые прионы точно соответствуют определению, являясь белковым инфекционным агентом; они не связаны с какой-либо нуклеиновой кислотой (НК), поскольку препарат фибрилл,

образованных *in vitro*, был очищен от НК, и в нем не могло быть НК, специфичной для дрожжей;

— по структуре прион подобен амилоиду;

— варианты приона определяются разной укладкой белка в составе полимера.

Таким образом, дрожжевые прионы представляют собой амилоидные фибриллы, мелко нарезанные с помощью Hsp104.

Прионные варианты

Прион $[PSI^+]$, как и прионы млекопитающих, может существовать во множестве вариантов. Обычно их различают по эффективности супрессии нонсенс-мутаций и стабильности наследования. Эти параметры коррелируют и определяются с невысокой точностью, что не позволяет различить с их помощью большое количество вариантов. Поэтому общее число

возможных вариантов неясно, их могут быть как единицы, так и сотни.

На практике варианты $[PSI^+]$ грубо делят на два класса — сильные и слабые. Для первых характерна высокая эффективность супрессии нонсенс мутаций и высокая стабильность наследования, у вторых эти параметры снижены. Из результатов биохимического анализа следует, что клетки с сильным $[PSI^+]$ содержат меньше мономерного Sup35 по сравнению со слабым $[PSI^+]$, а прионные полимеры Sup35 более коротки. Это позволяет понять сравнительную динамику прионной полимеризации у вариантов $[PSI^+]$. Меньший размер прионных частиц означает их большее число и более эффективную полимеризацию, что приводит к меньшему количеству мономерного Sup35 и более эффективной супрессии. Увеличенное число прионных частиц также обеспечивает более высокую стабильность наследования. В целом, «сила» варианта $[PSI^+]$ возрастает с увеличением частоты фрагментации прионных частиц [13].

Примечательно, что некоторым структурно возможным вариантам амилоида Sup35 соответствуют параметры $[PSI^+]$, несовместимые либо с жизнью клетки, либо с наследованием приона. Так, в некоторых вариантах $[PSI^+]$ остается слишком мало мономерного Sup35, что нарушает жизнеспособность клетки [16]. На противоположном конце спектра вариантов $[PSI^+]$ находятся ненаследуемые амилоиды Sup35, обнаруженные нами.

Они образуются при сверхпродукции Sup35 в клетках, содержащих прион $[PIN^+]$. Этот прион, основанный на белке Rnq1, известен тем, что он облегчает возникновение $[PSI^+]$, видимо, служа не-совершенной затравкой для полимеризации Sup35. При стандартном уровне Sup35 в клетках $[PIN^+]$ его полимеров очень мало, однако при сверхпродукции Sup35 (примерно в 20 раз) его доля в полимерной фракции возрастает до 80%. Эти полимеры, однако, неспособны к самостоятельному наследованию, и существуют лишь благодаря их частому возникновению на основе прионных частиц Rnq1. Такие полимеры Sup35 имеют очень большой размер, что говорит об их очень редкой фрагментации [17]. Таким образом, существующие *in vivo* амилоиды Sup35 можно ранжировать по частоте фрагментации: от часто фрагментируемых сильных $[PSI^+]$ до слишком редко фрагментируемых ненаследуемых.

Можно полагать, что редкая фрагментация может не только быть причиной ненаследуемости амилоидов в дрожжах, но и объяснять неинфекционность амилоидных болезней человека в сравнении с прионами. Инфекционность амилоидов должна возрастать с уменьшением их размера, поскольку при этом больше амилоидных частиц на единицу массы и выше их способность к перемещению. Прионные частицы PrP^{Sc} имеют сравнительно малый размер. Например, при болезни Крейтцфельдта-Якоба прионные отложения (бляшки) часто появляются позже, чем первые симптомы заболевания, или не образуются вовсе, что указывает на малый размер приона. А интенсивное формирование бляшек при амилоидных болезнях свидетельствует о большом размере и малой мобильности амилоидных частиц, что уменьшает инфекционность. Грань между прионами и амилоидами тонка: известно, что некоторые амилоидные болезни обладают слабой инфекционностью, которую можно выявить у модельных животных при условиях, способствующих амилоидогенезу. Такими условиями могут быть повышенная продукция амилоидогенного белка, либо введение амилоидов не через пищевой тракт, а внутрицеребрально.

Механизм фрагментации прионов дрожжей

Ключевую роль во фрагментации прионных амилоидов в дрожжах играет Hsp104, но при существенном содействии других шаперонов. Напомним, что белки этого класса обеспечивают и контролируют правильную пространственную укладку других белков. Фрагментация начинается с того, что шаперон Sis1 семейства Hsp40 распознает в прионной частице какие-то элементы неправильно уложенной белковой структуры. Другие дрожжевые Hsp40, в частности, наиболее вы-

соко экспрессируемый Ydj1, видимо, не участвуют во фрагментации. Согласно имеющимся данным, прионный домен упакован в амилоидную структуру не полностью, и какая-то его часть остается неструктурированной. При этом у сильных вариантов $[PSI^+]$ размер неуложенной области больше, чем у слабых. Вероятно, эту область и распознает Sis1, а затем, при участии шаперона Ssa (семейства Hsp70), передает ее Hsp104 — большому белку массой более 100 кДа, содержащему два АТФ-расщепляющих блока. Его рабочая форма представляет кольцо из шести молекул. Hsp104 цепляет полипептидную цепь прионного белка и протягивает ее сквозь дырку в кольце, таким образом расплетая этот белок и извлекая его из полимера, который в результате распадается на две части (рис.2).

Частота фрагментации — ключевой фактор, определяющая число прионных частиц, эффективность прионного превращения и выраженность прионного фенотипа. Но что определяет частоту фрагментации?

Было обнаружено, что фибриллы, соответствующие сильному варианту $[PSI^+]$, значительно менее прочны, чем фибриллы слабого $[PSI^+]$. В согласии с этим, картирование области Sup35, составляющей ядро (стебель) амилоида с помощью водородно-дейтериевого обмена показало, что у «сильных» фибрилл в ядро амилоида, уложена меньшая часть прионного домена (аминокислотные остатки 1—37, полный домен состоит из первых 123 остатков), чем у «слабых» (остатки 1—70) [18]. Эти наблюдения породили предположение, что частота фрагментации определяется прочностью амилоида.

В противоположность этому, мы выяснили, что частота фрагментации определяется в первую очередь способностью шаперонов распознавать амилоид как субстрат для фрагментации. В частности, «сильную» фибриллу Sup35 легче узнать, чем «слабую», поскольку у нее больше неструктурированный остаток прионного домена, не уложенный в ядро и привлекающий шапероны [19]. Но как распознаваемость зависит от последовательности прионного домена? Помимо размера неупорядоченной области, все зависит от ее аминокислотного состава, но не требует каких-либо специфических элементов последовательности, поскольку, как было установлено, ее случайная перетасовка в прионном домене Sup35 не нарушает его прионных свойств [20]. Чтобы изучить влияние аминокислотного состава на фрагментацию, мы создали набор генов Sup35, в которых прионный домен был заменен на последовательности (QQQXQ)_n, где Q — глутамин, а X — любая аминокислота, с общей длиной повторов от 70 до 100 остатков. Полимеры на основе чисто полиглутаминовой последовательности фрагментируются достаточно редко, что позволяет наблюдать эффект добавления

других аминокислот. Например ароматические аминокислоты тирозин, триптофан или фенилаланин вызывали максимальный эффект, многократно усиливая фрагментацию, а аланин, серин, треонин, цистеин и метионин — средний. Аспарагин, глицин, валин и изолейцин не улучшали фрагментацию, а пролин и лейцин препятствовали образованию полимеров [19]. Таким образом, частота фрагментации зависит от размера и аминокислотного состава неструктурированной области прионного домена, не упакованной в ядро амилоида.

Распространенность и роль в природе

Выявление прионов у дрожжей стимулировало дальнейший поиск и позволило предположить, что эти белки распространены в природе и не всегда связаны с болезнью. Пока наибольшие успехи в поиске прионов относятся к дрожжам *S.cerevisiae*. Прионная природа белка Ure2 дрожжей была обнаружена одновременно с Sup35 [3]. Соответствующий прион, [URE3], связан с метаболизмом азота и позволяет использовать его неудобные источники (уреидосукцинат) в присутствии предпочитаемых соединений (солей аммония). Анализ первичной структуры Sup35 и Ure2 выявил значимое сходство: оба содержали прионогенный аминоконцевой домен, обогащенный остатками глутамина и аспарагина (QN), а также функциональный домен. Затем был найден прион [PIN⁺], повышающий частоту возникновения [PSI⁺]. Соответствующий белок, Rnq1, также богат QN, хотя и не содержит явного функционального домена. Был произведен целенаправленный анализ QN-богатых белков, в результате чего было обнаружено еще несколько прионов [21]. Кроме того, многие из QN-богатых белков оказались способны образовывать амилоиды при повышенной активности, но не могли стабильно сохранять прионное состояние при обычной экспрессии. Недавно найден первый прион дрожжей, Mod5 [MOD⁺], не обогащенный остатками QN. Заметим, что, в противоположность дрожжам, белок PrP и большинство амилоидных белков млекопитающих не отличаются избытком QN. Исключение составляют гентингин (агрегирующий в нейронах головного мозга) и еще несколько белков, образующих амилоиды при удлинении в них полиглутаминового участка.

Являются ли прионы низших эукариот патогенными или же выполняют какую-то полезную функцию? Лишь один из них имеет явную функцию: прион [het-s] гриба *P.anserina* входит в систему вегетативной несовместимости, контролирующую дальнеродственные скрещивания гриба. Сочетание приона и определенных аллелей гена *het-s* запускает механизм гибели клеток, образу-

ющихся при скрещивании. Фактически, прион случайным образом делит популяцию на две части. Одна из них консервативна, «строга» к скрещиваниям, что защищает ее от вирусных эпидемий, другая же пользуется всеми благами генетического обмена, но рискует встретиться с вирусом. А популяция в целом получает достоинства обеих стратегий.

Преимущества прионов дрожжей не столь очевидны, хотя некоторые из них дают потенциально полезные фенотипы. Так, [MOD⁺] повышает устойчивость к фунгицидам группы азолов; [PSI⁺] компенсирует нонсенс-мутации, а [URE3] позволяет усваивать бедные источники азота. Но, кроме того, каждый из прионов прямо или косвенно влияет на множество различных функций и фенотипических характеристик. В частности, пять из девяти прионных белков дрожжей (Ure3, Swi1, Mot3, Cys8 и Sfp1) участвуют в регуляции транскрипции. Появление прионов в отдельных клетках популяции дрожжей случайно, а их многочисленные фенотипические проявления непредсказуемы. Но они вносят фенотипическое разнообразие и позволяют популяции найти лучший ответ на различные неблагоприятные условия (температуру, отсутствие воды и питания), часто возникающие в природе. Примечательно, что при нормализации условий прионы, в отличие от мутаций, могут быть потеряны со сравнительно высокой частотой, и тогда клетки вернуться точно к исходному фенотипу.

Непатогенные амилоиды обнаружены не только у дрожжей. У *E.coli* найдены амилоидные фибриллы, образующие матрикс вокруг клеток. Эти внеклеточные структуры, называемые «curli», состоящие из белка CsgA, позволяют бактериям формировать биопленки и колонизировать новые субстраты.

Аналогичные амилоиды обнаружены и у некоторых других бактерий. Патогенность *Xanthomonas* (болезнетворные бактерии растений, в частности табака) опосредуется внеклеточными амилоидами белков харпинов. Проникая в межклеточное пространство, их фибриллы дестабилизируют мембраны растительных клеток и вызывают их гибель. Амилоиды часто используются для построения защитной внешней структуры клеток, поскольку их отличает высокая жесткость и способность к самосборке. Такие амилоиды наблюдали у актинобактерий *Streptomyces*, у грибов *Neurospora crassa* и у дрожжей. Амилоиды укрепляют хорион (оболочку яйца у бабочек *Antberaea polyphemus*) и входят в состав паутины [22]. Функциональные амилоиды обнаружены и внутри клеток животных. Так, амилоиды белка pMel17 служат матрицей для полимеризации меланина в меланосомах и, таким образом, ответственны за пигментацию кожи. Полимеризация белка Orb2 в синапсах нейронов дрозофилы — ключевое событие в фиксации

долговременной памяти. Интересно, что при экспрессии гена, кодирующего белок Orb2 (как и его аналог из улитки *Aplysia californica*), в дрожжах проявляют прионные свойства [23]. Можно предполагать, что и у человека память устроена аналогично.

Таким образом, прионы и амилоиды могут не только вызывать болезни, но и играть важную биологическую роль. Можно ожидать открытия множества новых механизмов, связанных с прионами и амилоидами, поскольку для большинства организмов их поиск еще не был проведен. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и программы Президиума РАН «Молекулярная и клеточная биология».

Литература

1. Prusiner S.B., Scott M.R., DeArmond S.J. et al. Prion protein biology // *Cell*. 1998. V.93. №3. P.337–348.
2. Cox B.S. [PSI], a cytoplasmic suppressor of super-suppressors in yeast // *Heredity (Edinb)*. 1965. V.20. P.505–521.
3. Wickner R.B. [URE3] as an altered URE2 protein: evidence for a prion analog in *Saccharomyces cerevisiae* // *Science*. 1994. V.264. №5158. P.566–569.
4. Pausbkin S.V., Kushnirov V.V., Smirnov V.N. et al. Propagation of the yeast prion-like [psi⁺] determinant is mediated by oligomerization of the SUP35-encoded polypeptide chain release factor // *EMBO J*. 1996. V.15. №12. P.3127–3134.
5. Patino M.M., Liu J.J., Glover J.R. et al. Support for the prion hypothesis for inheritance of a phenotypic trait in yeast // *Science*. 1996. V.273. №5275. P.622–626.
6. Pausbkin S.V., Kushnirov V.V., Smirnov V.N. et al. In vitro propagation of the prion-like state of yeast Sup35 protein // *Science*. 1997. V.277. №5324. P.381–383.
7. Cohen F.E., Pan K.M., Huang Z. et al. Structural clues to prion replication // *Science*. 1994. V.264. №5158. P.530–531.
8. Chiti F., Dobson C.M. Protein misfolding, functional amyloid, and human disease // *Annu. Rev. Biochem.* 2006. V.75. P.333–366.
9. Roberts B.T., Wickner R.B. Heritable activity: a prion that propagates by covalent autoactivation // *Genes Dev*. 2003. V.17. №17. P.2083–2087.
10. Glover J.R., Kowal A.S., Schirmer E. C. et al. Self-seeded fibers formed by Sup35, the protein determinant of [PSI⁺], a heritable prion-like factor of *S.cerevisiae* // *Cell*. 1997. V.89. №5. P.811–819.
11. Chernoff Y.O., Lindquist S.L., Ono B. et al. Role of the chaperone protein Hsp104 in propagation of the yeast prion-like factor [psi⁺] // *Science*. 1995. V.268. №5212. P.880–884.
12. Kushnirov V.V., Ter-Avanesyan M.D. Structure and replication of yeast prions // *Cell*. 1998. V.94. №1. P.13–16.
13. Kryndushkin D.S., Alexandrov I.M., Ter-Avanesyan M.D. et al. Yeast [PSI⁺] prion aggregates are formed by small Sup35 polymers fragmented by Hsp104 // *J. Biol. Chem.* 2003. V.278. №49. P.49636–49643.
14. Byrne L.J., Cole D.J., Cox B. S. et al. The number and transmission of [PSI] prion seeds (Propagons) in the yeast *Saccharomyces cerevisiae* // *PLoS One*. 2009. V.4. №3. P.e4670.
15. Tanaka M., Chien P., Naber N. et al. Conformational variations in an infectious protein determine prion strain differences // *Nature*. 2004. V.428. №6980. P.323–328.
16. McGlinchey R.P., Kryndushkin D., Wickner R.B. Suicidal [PSI⁺] is a lethal yeast prion // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2011. V.108. №13. P.5337–5341.
17. Salnikova A.B., Kryndushkin D.S., Smirnov V.N. et al. Nonsense suppression in yeast cells overproducing Sup35 (eRF3) is caused by its non-heritable amyloids // *J. Biol. Chem.* 2005. V.280. №10. P.8808–8812.
18. Toyama B.H., Kelly M.J., Gross J.D. et al. The structural basis of yeast prion strain variants // *Nature*. 2007. V.449. №7159. P.233–237.
19. Alexandrov A.I., Polyanskaya A.B., Serpionov G.V. et al. The effects of amino acid composition of glutamine-rich domains on amyloid formation and fragmentation // *PLoS One*. 2012. V.7. №10. P.e46458.
20. Ross E.D., Edskes H.K., Terry M.J. et al. Primary sequence independence for prion formation // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2005. V.102. № 36. P.12825–12830.
21. Alberti S., Halfmann R., King O. et al. A systematic survey identifies prions and illuminates sequence features of prionogenic proteins // *Cell*. 2009. V.137. №1. P.146–158.
22. Миронова Л.Н., Гозинашвили А.И., Тер-Аванесян М.Д. Биологические функции амилоидов: факты и гипотезы // *Молекулярная биология*. 2008. Т.42. С.798–808.
23. Majumdar A., Cesario W.C., White-Grindley E. et al. Critical role of amyloid-like oligomers of *Drosophila* Orb2 in the persistence of memory // *Cell*. 2012. V.148. №3. P.515–529.

Как смешать полимеры?

А.Л.Волынский

В нашей повседневной жизни мы постоянно имеем дело с огромным количеством самых разных веществ и материалов. И как правило, все эти объекты представляют собой не чистые вещества, а их смеси, иногда из компонентов, резко различающихся по своей химической природе. Использование чистых веществ скорее исключение, чем правило, и привести такие примеры весьма сложно. К их числу относятся поваренная соль (хлористый натрий), сахароза, дистиллированная вода, некоторые минералы (вроде алмазов или слитков благородных металлов) — практически это все. Остальное многообразие материалов, с которыми человек сталкивается каждый день, — это смеси, сплавы самых различных химических веществ.

Неудивительно поэтому, что получение разного рода смесей давно превратилось в самостоятельную область науки и технологии. Смешение различных компонентов мы наблюдаем практически повсюду — от выпечки хлеба до получения бетона и выплавки металлов. Однако сама по себе эта задача не проста и в некоторых случаях очень нелегка. Не представляет никакой проблемы создание газовых смесей, примером чему служит, например, наша атмосфера. Во всех остальных случаях (приготовление жидкой или твердой смеси веществ) могут возникать серьезные сложности. Попробуйте смешать растительное масло с водой: сначала произой-



Александр Львович Волынский, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова. Область научных интересов — структура и механика полимеров.

дет некоторое их взаимное диспергирование, однако, если процесс перемешивания прекратить, эти жидкости немедленно разделятся на два самостоятельных слоя.

Возникают вопросы: какие факторы ответственны за перемешивание веществ различной химической природы и какие приемы можно использовать для достижения указанной цели?

Природа смешивания

В мире атомов и молекул на их взаимном расположении сказываются два главных фактора. Первый из них — сила межмолекулярного взаимодействия. Благодаря этой силе в твердых телах атомы находятся друг относительно друга на равновесных расстояниях.

Равновесное расстояние r_0 (рис.1) соответствует минимуму потенциальной энергии, и для того чтобы сместить атомы из этого состояния, внешним силам необходимо совершить работу. При сближении атомов энергия может расти до бесконечности, а при их удалении друг от друга она быстро достигает нуля, что соответствует разрушению твердого тела. Очевидно, что указанный фактор создает условия для упорядоченного расположения молекул; его называют *внутренней энергией U*.

Второй важный фактор — хорошо известное тепловое движение молекул. Тепловые колебания смещают молекулы из их равновесных состояний, и, в противовес действию внутренней энергии, «хотят» перемешать все атомы и создать полный хаос. Это так называемый *энтропийный вклад*, который присутствует во всех термодинамических процессах; его обозначают как ST , где S — энтропия, т.е. функция беспорядка в расположении атомов и молекул, а T — абсолютная температура. Естественно, этот вклад растет с увеличением температуры. Энтропийный фактор определяется главным образом

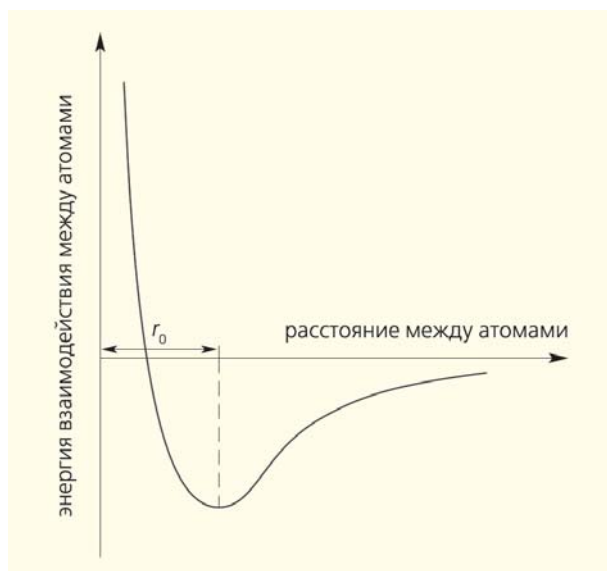


Рис.1. Зависимость энергии взаимодействия между атомами от расстояния между ними.

возможностями атомов занимать в пространстве как можно больше различных положений. Понятно, что энтропия газа намного выше, чем твердого тела, где положения атомов фиксированы.

В реальности ситуация в мире атомов и молекул задается соотношением указанных выше факторов. Их разность $U - TS$ обозначается буквой F и называется *свободной энергией*. Термодинамическая система, т.е. система, состоящая из огромного количества отдельных атомов (молекул), всегда стремится к минимальной свободной энергии, которая и определяется конкуренцией энергетического (U) и энтропийного (TS) вкладов в ее величину.

Возвращаясь к нашей теме, сформулированной в заголовке статьи, важно подчеркнуть главную особенность полимеров — цепное строение их макромолекул, лежащее в основе всех их характеристических свойств. Поскольку атомы (атомные группы) в полимере связаны между собой ковалентными (очень крепкими) связями, очевидно, что его энтропия будет меньше, чем энтропия такого же количества малых, независимых молекул. В полимерных цепях атомы (атомные группы) не являются независимыми, поскольку связаны в цепочки, что мешает им занимать любые положения в пространстве. Именно этим обстоятельством объясняются трудности, возникающие при смешении двух или более полимеров. Однородно перемешать вещества, имеющие малые значения энтропии, очень трудно, поскольку энтропийный выигрыш свободной энергии в результате этого процесса очень мал. Вот макромолекулы и не «хотят» самопроизвольно перемешиваться, как это делают, например, молекулы спирта и воды. «Насильственное» перемешивание двух

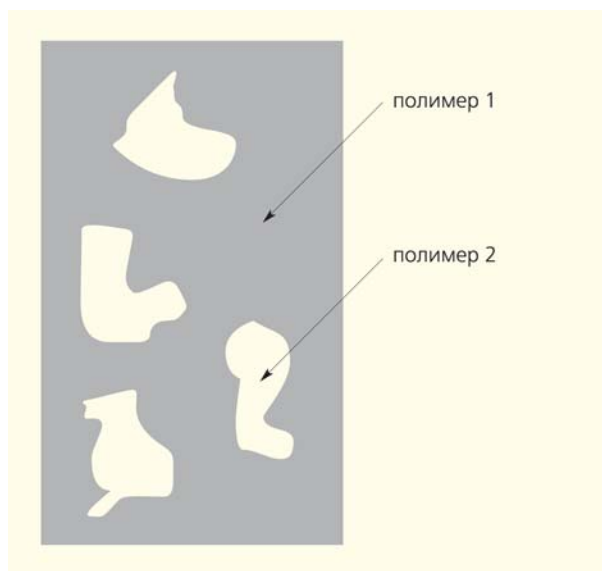


Рис.2. Схематическое изображение структуры смеси полимеров, полученной при их механическом перемешивании.

полимеров в экструдере* ни к чему хорошему не приводит: получается грубая смесь компонентов, состоящая из их протяженных агрегатов нерегулярной формы, вкрапленных в непрерывную матрицу второго полимера (рис.2). Такого рода смеси «грубого помола» имеют низкие механические показатели и, как правило, невозпроизводимые другие свойства. Очевидно, что получение смесей полимеров простым механическим перемешиванием не имеет практического смысла.

В то же время научиться получать однородные, высокодисперсные смеси полимеров крайне важно и перспективно, поскольку это открывает возможность изготовить неограниченное число материалов с новыми и часто очень ценными свойствами. Итак, поскольку самопроизвольно полимеры, как правило, перемешиваться не «желают», химики и технологи идут на всевозможные хитрости, чтобы преодолеть это затруднение [1].

Сополимеры

Раз полимерные молекулы «сопротивляются» перемешиванию, первое, что приходит в голову, — перемешать мономеры, которые, будучи низкомолекулярными веществами, состоящими из независимых молекул малого размера, станут смесью «охотно». А уже смесь мономеров можно заполимеризовать, в результате чего образуются цепочки, содержащие химические группы различной

* Экструдер — установка для формования пластичных материалов, форма которым придается путем продавливания (экструзии) через профилирующий инструмент (экструзионную головку).

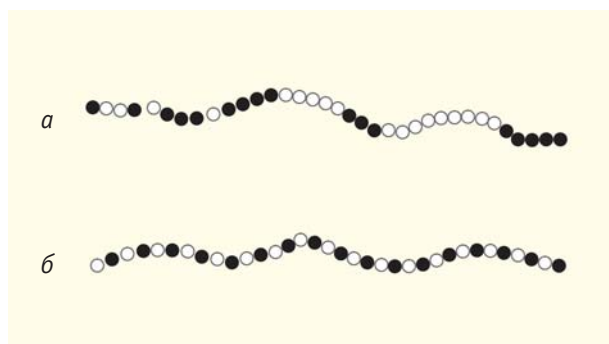


Рис.3. Структура цепи статистического (а) и чередующегося сополимера (б).

природы. Другими словами, получится, по сути, смесь двух (или более) полимеров, соединенных в единые цепи макромолекул, которые называются *статистическими сополимерами*. Рисунок 3,а демонстрирует такого рода структуру. Статистический сополимер содержит в своей основной цепи различные звенья, которые обозначены черными и белыми кружками. Закономерности получения подобных материалов сейчас хорошо изучены, что позволяет в широких пределах изменять состав таких макромолекул, а следовательно, и свойства получаемых на их основе продуктов.

Существует принципиальная возможность расположить звенья в цепи полимера и другим образом. Можно в регулярном порядке соединить разнородные звенья друг с другом (белый — черный, белый — черный и т.д.), рис.3,б. Такие сополимеры называются *чередующимися*. Очевидно, что расположение звеньев в основной цепи может служить своеобразным способом направленного регулирования состава, а следовательно, и свойств сополимеров.

Получение статистических и чередующихся сополимеров — далеко не единственный путь, который позволяет сочетать свойства разных полимеров благодаря образованию химически связанных групп различной природы. Можно, создав макромолекулу из групп одного вида мономеров,

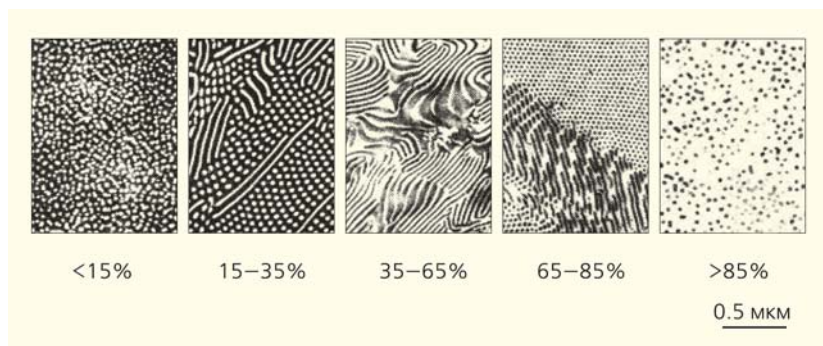


Рис.5. Электронные микрофотографии блок-сополимеров ПС-ПБ различного состава (цифры под снимками — содержание ПС в блок-сополимере) [4].

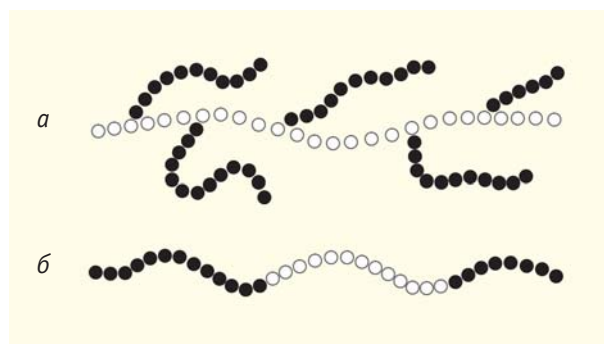


Рис. 4. Схематическое изображение макромолекулы привитого сополимера (а) и блок-сополимера (б).

прикрепить (привить) к этой основной цепи боковые цепочки из групп другой химической природы (рис.4,а). Такие продукты, *привитые сополимеры*, позволяют в широких пределах изменять состав (и соответственно свойства) конечного полимерного материала.

Более того, эти боковые привески (радикалы) могут быть очень длинными, и тогда образуются полимерные молекулы, известные под названием *гребнеобразные*. Длинные боковые радикалы в гребнеобразных полимерах могут жить своей жизнью и придавать полимеру в целом новые, например жидкокристаллические, свойства [2].

И наконец, химики разработали методы получения *блок-сополимеров* [3]. Последние построены из достаточно протяженных цепочек одной химической природы (блоков), соединенных по концам с достаточно протяженными цепочками другой химической природы (рис.4,б). Хотя эти последовательности и соединены в единые цепи, они несовместимы, и поэтому в таких системах наблюдаются процессы фазового разделения на микроуровне. Далеко удалиться друг от друга блоки не могут, так как по концам они связаны крепкими (ковалентными) химическими связями. В результате образуются материалы, в которых возникают суперрешетки, построенные из выделившихся в отдельную фазу блоков различной химической природы. Демонстрирует это явление рис.5, где представлены электронно-микроскопические снимки тонких пленок блок-сополимера, построенного из блоков полистирола (ПС) и полибутадиена (ПБ). Изменение соотношения блоков приводит к решительной трансформации структуры материала. Естественно, что такие материалы имеют целый комплекс разных характеристик, резко отличающихся от параметров отдельных полимеров, из которых они построены.

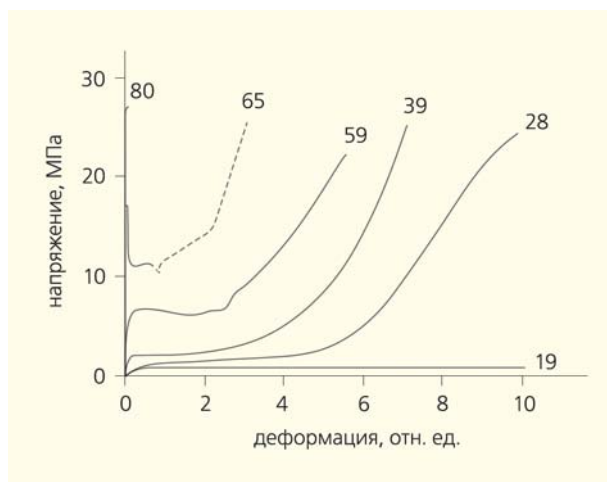


Рис.6. Кривые растяжения блок-сополимеров ПС-ПБ в зависимости от их состава и морфологии [5]. Левая кривая (для чистого ПС) демонстрирует хрупкое поведение, правая — каучукоподобное.

Проиллюстрируем, каким образом состав и морфология полученных блок-сополимеров отражаются на их механическом поведении. На рис.6 приведены кривые растяжения блок-сополимеров на основе ПС (жесткого стеклообразного компонента) и ПБ (каучукоподобного мягкого компонента) в зависимости от их состава. Хорошо видно, что при его изменении механическое поведение блок-сополимера меняется в широких пределах: от хрупкого, характерного для чистого ПС (разрушение при малых, в 1–2%, значениях деформации), до каучукоподобного, когда полимер можно деформировать без разрушения даже в 10 раз.

Ударопрочный полистирол

В предыдущем разделе продемонстрирован, по сути, случай, когда хрупкий стеклообразный полимер (ПС) превращается в пластичный, высокоэластический продукт при прикреплении к ПС цепям каучукоподобных блоков ПБ. Однако следует отметить, что получение блок-сополимеров — это весьма сложный, трудоемкий и достаточно дорогостоящий процесс. В то же время ПС — один из самых дешевых, легко получаемых и выпускающихся в огромных количествах (сотни тысяч тонн) полимеров. Он обладает низким влагопоглощением, высокой влагостойкостью и морозостойкостью, отличными диэлектрическими характеристиками, нерастворим в воде, легко формуется и окрашивается, хорошо обрабатывается механическими способами и склеивается. К сожалению, как было отмечено выше (рис.6), у столь привлекательного полимера есть один, но очень серьезный недостаток. Это хрупкий ма-

териал. При комнатной температуре он разрушается, если его растянуть всего лишь на 1–3%. На рис.6 кривую растяжения чистого ПС трудно разглядеть, настолько близко она (вследствие его хрупкости) прилегает к оси ординат.

Неудивительно поэтому, что химики и технологи уже давно (с первой половины XX в.) пытаются каким-либо образом уменьшить хрупкость ПС, чтобы расширить области его практического использования. Одной из таких успешных попыток стала полимеризация стирола (мономера для изготовления ПС) с добавлением небольшого количества мягкого каучукообразного полибутадиена. Поскольку в макромолекуле ПБ содержатся двойные связи, мы в этом случае осуществляем, по сути, привитую сополимеризацию стирола с ПБ. Молекулярная структура привитого сополимера была рассмотрена выше (она представлена на рис.4,а). Несмотря на то что мягкого компонента (ПБ) в таком сополимере, как правило, немного (не более 5–10%), этого количества вполне хватает, чтобы решительно изменить механическое поведение материала, и в первую очередь, избавить его от хрупкости. По этой причине получаемый в результате указанной реакции продукт назвали *ударопрочным полистиролом* (УПС) [1].

На рис.7 представлены кривые растяжения ПС (1) и УПС (2). Хорошо видно, что чистый ПС, как было отмечено выше, разрушается при малых деформациях (1–3%), в то время как УПС может деформироваться в условиях растяжения на 40 и более процентов, т.е. неприятное свойство ПС (хрупкость) полностью утрачивается. Более того, если растянутый на 30% УПС освободить из зажимов растягивающего устройства, полимер демонстрирует значительную усадку, совершенно нехарактерную для стеклообразного состояния полимера, в котором находится чистый ПС при комнатной температуре. Возникает вопрос: каким об-

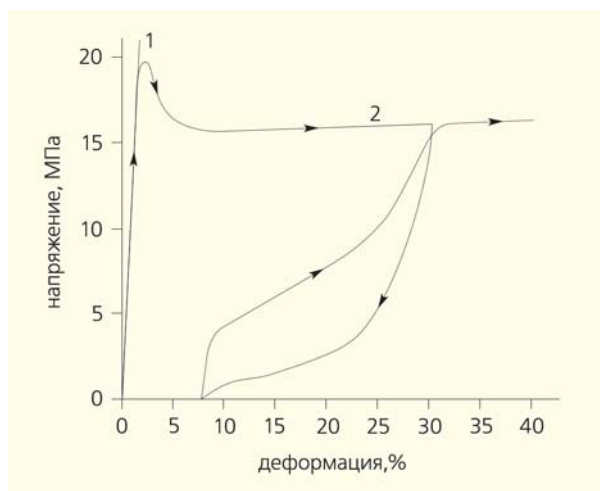


Рис.7. Кривые растяжения чистого (1) и ударопрочного ПС (2) при комнатной температуре.

разом незначительное количество (5–10%) добавленного ПБ столь сильно изменяет механическое поведение результирующего продукта?

Структурные исследования позволяют на него ответить. ПС и ПБ, как и большинство полимерных пар, несовместимы, и по этой причине при реакции сополимеризации стирола и ПБ происходит процесс фазового разделения. Однако это разделение происходит весьма своеобразно. Выделившийся в отдельную фазу ПБ, имеющий темную окраску, образует небольшие включения в непрерывной полимерной матрице (рис.8,а). Указанные включения содержат значительные количества ПС и однородно распределены в его объеме. Если мы будем деформировать чистый ПС (рис.7, кривая 1), то неизбежно возникающий при

этом, как и в любом деформируемом твердом теле, дефект (концентратор напряжения) будет разрастаться и приведет к его макроскопическому разрушению. Наличие множества мелких включений в УПС (рис.8,а), однородно распределенных в материале, препятствует образованию одного такого опасного дефекта. Вместо этого непрерывная ПС-матрица начинает сама неупруго (пластически) деформироваться между указанными включениями. Зоны такого деформированного материала на рис.8,б видны в виде темных полос, соединяющих соседние каучуковые включения. Подобного рода зоны пластически деформированного полимера имеют микропористую структуру и называются крейзами (рис.8, в). Подробнее это явление было рассмотрено ранее [4], а здесь лишь отметим, что создание таких высокодисперсных образований требует значительных затрат механической работы, что мы и наблюдаем в эксперименте. Работа деформации характеризуется площадью под кривой растяжения (рис.7); нетрудно убедиться, что указанная работа в случае деформации УПС на несколько порядков больше, чем при деформировании чистого ПС.

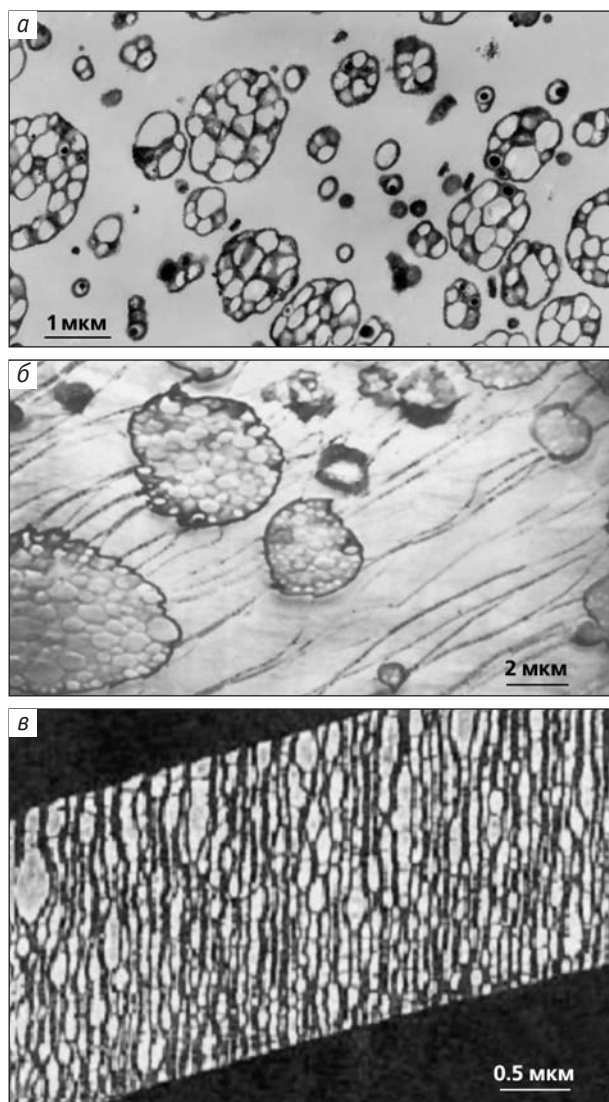


Рис.8. Электронные микрофотографии ультратонких срезов ударопрочного ПС до деформации (а) и после растяжения на 30% при комнатной температуре (б). Электронная микрофотография единичного крейза в ПС-пленке (в).

Взаимопроникающие полимерные сетки

Существует еще один общий подход для создания многокомпонентных полимерных систем. Он использует одно из удивительных свойств, присущих только полимерам, — их способность к набуханию. Если мы хотим растворить какое-либо вещество, например сахар, в воде и приведем эти вещества в контакт, произойдет следующее. Молекулы сахарозы, расположенные на поверхности, будут последовательно отрывать от нее и переходить в окружающую среду. Указанный процесс будет продолжаться до тех пор, пока все молекулы сахарозы не очутятся в водном окружении, в результате чего образуется однородный по составу раствор сахара в воде.

В случае полимеров процесс проходит принципиально иначе. При приведении полимера в контакт с растворителем маленькие и поэтому более подвижные молекулы растворителя ринутся в полимерную фазу. Другими словами, при соприкосновении полимера с растворителем поначалу не будут отщепляться отдельные макромолекулы с его поверхности, а начнется процесс набухания. Это становится возможным потому, что полимерные молекулы, имеющие цепочечное строение, способны изменять свою форму (конформацию). Свернутые макромолекулы в исходном, твердом полимере начинают разворачиваться, освобождая промежутки между собой для маленьких молекул растворителя (рис.9). Указанный процесс происходит самопроизвольно, в первую очередь потому, что при проникновении малых молекул в объем полимера увеличивается общая энтропия сис-

темы полимер—низкомолекулярное вещество. В результате общий объем полимера увеличивается, бывает, что очень существенно — на сотни, а иногда и тысячи процентов.

Зная эту особенность полимеров, химики достаточно давно и весьма успешно попытались осуществить следующую идею. Они взяли в качестве растворителя жидкий мономер №2 и привели его в контакт с готовым полимером №1. В результате произошло набухание и образовался материал, структура которого представлена на рис.9. После этого была проведена полимеризация мономера №2 непосредственно в полимере №1 (полимеризация *in situ*). Такой подход позволил получить практически неограниченное количество полимер-полимерных смесей, которые были названы взаимопроницающими полимерными сетками [5]. В этом случае внутри одной полимерной сетки образуется вторая, хотя исходные «готовые» полимеры перемешать не удастся. Структура такой двойной сетки представлена на рис.10.

Интерполиэлектродитные комплексы

До сих пор мы пытались преодолеть энтропийные затруднения, препятствующие перемешиванию полимерных молекул. С этой целью мы, где это только возможно, подменяли полимер мономером, имеющим высокой уровень энтропии, и благодаря этому «обману» добивались своей цели. Второй регулирующий фактор — внутреннюю энергию — мы практически не использовали.

На самом деле химики достаточно давно задействовали для получения смесей полимеров и внутреннюю энергию. Для этого необходимо сделать макромолекулы различной природы «привлекательными» друг для друга, заставить их притягиваться друг к другу. А что может быть более привлекательным (притягательным), чем притяжение (взаимодействие) противоположных электрических зарядов? С этой целью в полимеры вводили специальные функциональные группы: в одни — заряженные положительно, а в другие — отрицательно (рис.11).

Если растворы этих полимеров слить вместе, то энергетический выигрыш, который принесет взаимодействие противоположных электрических зарядов, с лихвой перекроет энтропийный проигрыш от смешения полимерных молекул. В результате противоположно заряженные макромолекулы будут интенсивно притягиваться друг к другу с образованием *интерполиэлектродитных комплексов* [6]. Такие комплексы часто нерастворимы в воде и при слиянии растворов противоположно заряженных макромолекул выпадают в осадок. Последний представляет собой очень однородную смесь двух сильно взаимодействующих полимеров, разделить которую на исходные компоненты часто совсем непросто.

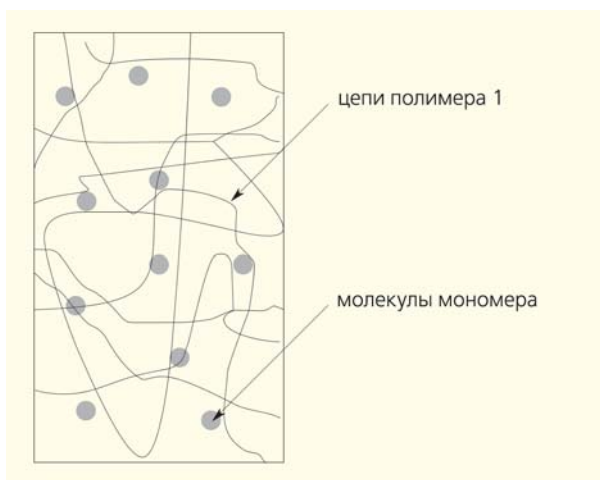


Рис.9. Структура полимера 1, подвергнутого набуханию в мономере 2.

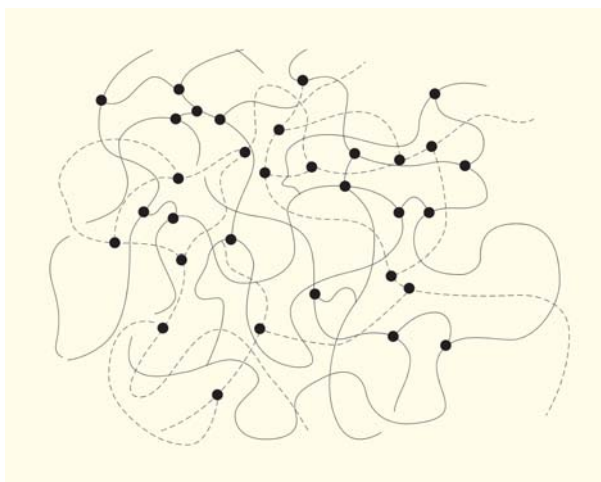


Рис.10. Структура взаимопроницающей полимерной сетки, в которой цепочки одного полимера (сплошные линии) перемешаны с цепочками другого полимера (пунктирные линии).

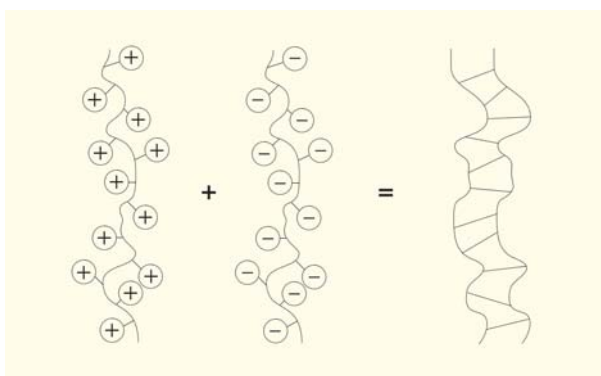


Рис.11. Схема образования интерполиэлектродитного комплекса из двух полимеров, в цепях которых имеются положительные и отрицательные электрические заряды.

Пока мы рассматривали способы получения полимер-полимерных смесей, реализуемые с помощью химических реакций (синтез разного рода сополимеров, взаимопроникающих сеток или интерполиэлектролитных комплексов). Но с практической точки зрения это не всегда удобно, поскольку низкомолекулярные органические молекулы нередко бывают взрывоопасны, токсичны и создают экологические проблемы. Поиск возможных путей смешения полимеров без участия химических процессов продолжается, и здесь достигнуты определенные успехи.

Силовая сборка

Один из способов получения многокомпонентных полимерных систем — *силовая сборка* многослойных структур. Этот метод получения полимерных смесей основан на удивительных свойствах полимерных расплавов. Оказывается, если продавливать через плоскую щель (фильеру) два несовместимых полимерных расплава, они расслаиваются на отдельные слои. При последующем продавливании этой расслоившейся системы через следующую фильеру число таких слоев удваивается и т.д. В результате образуются многослойные полимерные пленки, которые можно рассматривать как своеобразные полимерные смеси [7]. Схематически устройство для такой сборки представлено на рис.12. Сообщество из N последовательных фильер дает число слоев в пленке $2^{(N+1)}$.

Казалось бы, получаемый продукт трудно назвать смесью полимеров, ведь слои в них остаются однокомпонентными. Однако метод силовой соэкструзии позволяет уменьшать толщину слоев вплоть до нанометрового уровня, а при таких размерах контактирующих пленок в их структуре происходят качественные изменения. На рис.13 представлены микроскопические изображения тонких срезов многослойных пленок

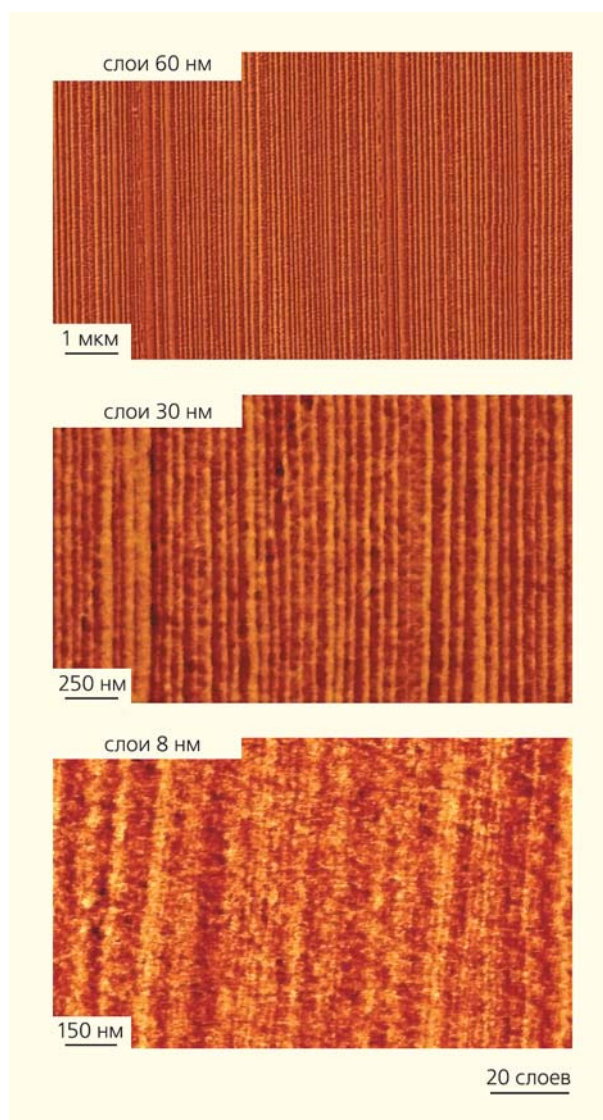


Рис.13. Атомно-силовое микроскопическое изображение поперечного среза многослойных пленок на основе ПЭТГ—ПС, имеющих разное количество слоев различной толщины [10].

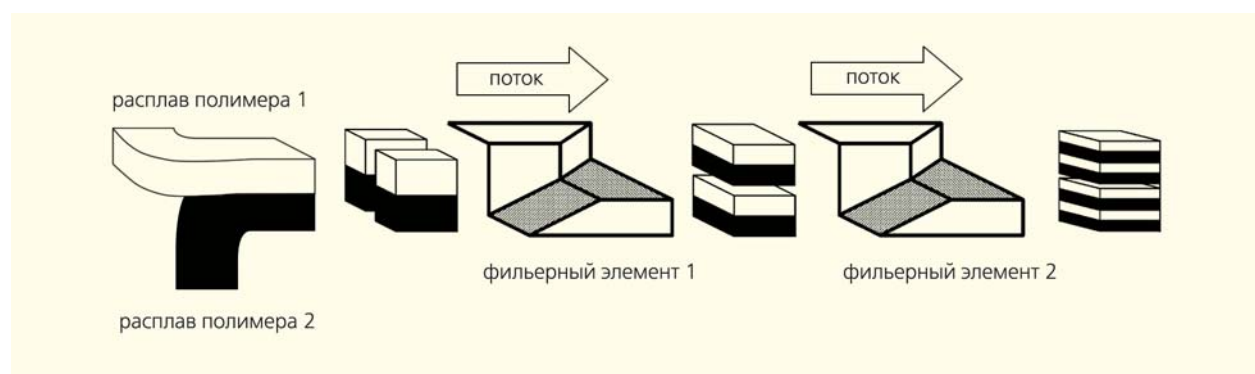


Рис.12. Схема устройства для соэкструзии расплавов, позволяющее осуществить силовую сборку многослойных пленок на основе несовместимых полимерных пар. Рисунок показывает начальную стадию процесса получения пленок, содержащих от 2 до 8 слоев.

на основе двух несовместимых полимеров (сополимера полиэтилентерфталат-со-1,4-циклогександиметилентерфталат-полистирол), полученным методом силовой соэкструзии [8]. Хорошо видно, что, пока толщина слоев полимеров составляет 30–60 нм, это действительно многослойные полимерные пленки. Однако дальнейшее уменьшение толщины слоев приводит к размыванию фазовых границ и практическому смешению несовместимых полимеров в единую композицию. Естественно, это обстоятельство сильнее всего отражается на свойствах получаемых материалов.

Итак, получить высокодисперсную смесь несовместимых полимеров можно и без использования химических реакций, хотя для этого может потребоваться изготовление достаточно сложных химико-технологических приспособлений (рис.12).

Универсальный крейзинг

Приведенные выше данные свидетельствуют, что, несмотря на термодинамическую несовместимость, ученые разработали многочисленные методы, позволяющие получать широкий ассортимент материалов на основе смесей полимеров. Как мы видели, эти методы опираются на химические и нехимические подходы. Кажется, что на поверхности лежит еще одно техническое решение: надо в одном полимере наделать множество мельчайших дырочек (по сути, превратить материал в некую пену), которые вслед за этим наполнить полимером №2. Проблема состоит в том, чтобы эти дырочки (поры) были нанометрового размера. В противном случае (если просто на сверлить в куске полимера дырки, в которые ввести полимер №2) получится разновидность ситуации, представленной на рис.2. Рассчитывать на получение высокодисперсной однородной смеси полимеров, имеющей перспективу практического использования, можно только при наполнении нанометровых пор. А задача такого рода измельчения полимера (да и любого твердого тела) очень непростая. Мы не можем здесь подробно останавливаться на этих трудностях, отметим только, что их преодолению посвящен один из старейших разделов физической химии — коллоидная химия [9].

Возникает вопрос: как же быть? И тут нам на помощь приходят важные фундаментальные свойства самих полимеров, одно из которых — способность их макромолекул к самодиспергированию на мельчайшие (нанометровые) агрегаты при самом обычном растяжении в некоторых жидкостях, называемых адсорбционно-активными. Это явление, общее для всех полимеров, получило имя «крейзинг», которое воспроизводит английский термин *crazing*, подчеркивающий

сводящие с ума особенности процесса (*crazy* — сумасшедший).

Оказывается, таким простейшим путем мы можем достичь поставленной цели [4]. Электронно-микроскопическое изображение крейза в стеклообразном полимере (ПС) представлено на рис.8 (внизу). Как следует из рисунка, такая структура представляет собой нечто похожее на одежду щетку, с той важной разницей, что щетинки и расстояния между ними составляют единицы-десятки нанометров. Важное условие развития структуры — непрерывное заполнение ее той самой жидкой средой, в которой проводят растяжение полимера. Итак, простейшим образом мы получаем измельченный до наносостояния полимер, пористая структура которого к тому же оказывается заполненной жидкостью. Очевидно, что, если в жидкой среде растворить некую добавку, в процессе развития этой уникальной пористой структуры наноразмерные поры будут заполнены раствором этой добавки. Именно на этих структурных особенностях крейзинга и был разработан на химическом факультете МГУ им.М.В.Ломоносова универсальный метод создания нанокомпозитов с полимерной матрицей [10].

Казалось бы, достаточно растворить в активной среде полимер №2, и в процессе крейзинга полимера №1 мы получим высокодисперсную смесь компонентов. Однако размеры клубков полимеров с высокими молекулярными массами (порядка 1 млн) в их растворах составляют 50–60 нм, а размеры пор в крейзах, как было отмечено выше, единицы и немногие десятки нанометров. Тем не менее попытки введения полимера №2 в матрицу полимера №1 при крейзинге в растворах полимера №2 были сделаны [11], и неожиданно оказалось, что вещества со столь высокими молекулярными массами (вплоть до 1 млн) эффективно проникают в нанопористую структуру крейзованного полиэтилентерфталата-

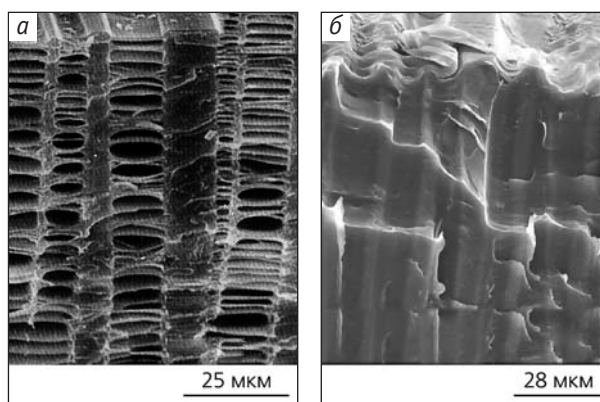


Рис.14. Электронные микрофотографии образцов ПЭТФ, деформированных на 100% в чистой адсорбционно-активной среде (а) и в 5-процентном растворе ПЭО с молекулярной массой 1 млн (б).

та (ПЭТФ), образуя соответствующий полимер-полимерный наноккомпозит. На рис.14 представлены электронные микрофотографии крейзованного в чистом растворителе полиэтилентерефталата и ПЭТФ, деформированного в растворе другого полимера — полиэтиленоксида (ПЭО) с молекулярной массой 1 млн. Хорошо видно, что высокомолекулярный ПЭО действительно проникает в нанопористую структуру крейзованного полимера и практически полностью заполняет ее.

Каким же образом клубки полимера, по размерам равные порам или превышающие их величину, эффективно проникают в них? Ответ на этот вопрос заключается в уникальных особенностях молекулярного движения длинных цепных полимерных молекул. Оказывается [12], цепные молекулы в ходе диффузии способны к *рептационному*, т.е. змееподобному, поступательному молекулярному движению — из-за того, что

соседние цепи пространственно ограничивают их перемещение.

Именно такое движение позволяет длинным цепным молекулам «заползать» в самые узкие щели и поры вне зависимости от молекулярной массы (длины цепочки) полимера. И так, рассмотренный выше способ получения полимерных смесей основан на характеристических свойствах полимеров. Это развитие фибриллярно-пористой структуры (крейзинг) с одной стороны, и способность к рептационному движению — с другой.

* * *

Хотя полимеры из-за своих молекулярных особенностей очень неохотно образуют смеси друг с другом, ученые научились справляться с возникающими трудностями. Благодаря этому сегодня производится огромное количество полимерных смесей, материалов, с помощью которых удастся решать важные практические задачи. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты 12-03-00338а, 14-03-00617а.

Литература

1. Полимерные смеси: В 2-х т. / Под ред. Д.Пола и С.Ньюмена. М., 1981.
2. Платэ Н.А., Шибеев В.П. Гребнеобразные полимеры и жидкие кристаллы. М., 1980.
3. Роговина Л.З., Слонимский Г.Л. Структура и свойства блок-сополимеров и их растворов // Успехи химии. 1977. Т.46. №10. С.1871—1903.
4. Волынский А.Л. Эффект Ребиндера в полимерах // Природа. 2006. №11. С.11—18.
5. Сперлинг Л. Взаимопроникающие полимерные сетки и аналогичные материалы. М., 1984.
6. Кабанов В.А. Полиэлектrolитные комплексы в растворе и в конденсированной фазе // Успехи химии. 2005. Т.74. №1. С.5—23.
7. Kerns J., Hsieh F., Hiltner A., Baer E. Comparison of irreversible deformation and yielding in microlayers of polycarbonate with poly(methylmethacrylate) and poly(styrene-co-acrylonitrile) // J. Appl. Polymer Sci. 2000. V.77. P.1545—1557.
8. Liu R., Bernal X.A., Hiltner A., Baer E. Interphase Materials by Forced Assembly of Glassy Polymers // Macromolecules. 2004. V.37. №18. P.6972—6979.
9. Шукин Е.А., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. 3 изд., перераб. и доп. М., 2004.
10. Волынский А.Л. Наноккомпозит с полимерной матрицей // Наука в России. 2009. №4. С.4—7.
11. Rukblya E.G., Litmanovich E.A., Dolinnyi A.I. et al. Penetration of poly(ethylene oxide) into the nanoporous structure of the solvent-crazed poly(ethylene terephthalate) films // Macromolecules. 2011. V.44. P.5262—5267.
12. De Gennes, P.-G. Scaling Concepts in Polymer Physics. Ithaca; N.Y., 1979.

Как возникла наука о сне

И.М.Завалко, В.М.Ковальзон

Сомнология — одна из наиболее бурно развивающихся областей нейронаук, изучающая механизмы и функции сна, а также заболевания, связанные с его нарушением. [1—4]. Наука эта молодая (в прошлом году ей исполнилось 60 лет), однако сон и сновидения интересовали людей с древнейших времен. О том, как формировалась современная сомнология, и пойдет речь в нашей статье.

Сон всегда ассоциировался с чем-то магическим, а сновидения многие народы считали способом общения с потусторонним миром. В Древней Греции в храмах, посвященных богу врачевания Асклепию, по сновидениям «диагностировали» болезни. Во многих древних культурах сон рассматривался как состояние, промежуточное между жизнью и смертью. Об этом говорят существующие и в настоящее время поверья, согласно которым душа человека во время сна выходит за пределы тела и парит в «мировом космосе», а утром возвращается. Но если разрисовать лицо краской или изменить внешний облик человека, то душа не сможет узнать свое тело и человек умрет [5]. Такие представления опирались на отсутствие у спящего человека реакции на внешние воздействия, а также на редкие случаи смерти во сне или при пробуждении (в современном понимании — от инфаркта или инсульта).

О связи сна со смертью упоминается и в древнегреческой



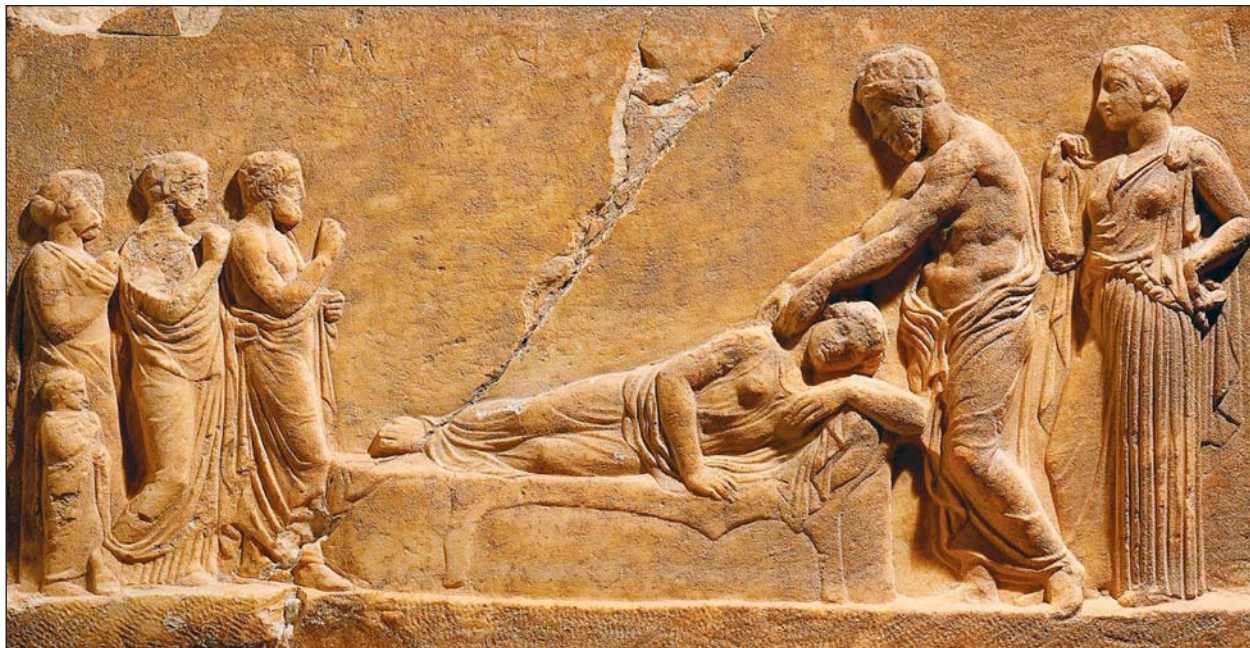
Ирина Михайловна Завалко, младший научный сотрудник Института медико-биологических проблем РАН. Член молодежного комитета секции сомнологии физиологического общества им. И.П.Павлова, участница программы Европейского общества по исследованию сна. Основные научные интересы связаны с психофизиологическим и клиническим изучением сна.



Владимир Матвеевич Ковальзон, доктор биологических наук, нейрофизиолог, специалист по экспериментальному изучению сна, главный научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН, председатель секции сомнологов физиологического общества им. И.П.Павлова. Занимается общей и экспериментальной сомнологией.

мифологии. Так, бог сна Гипнос приходился братом богу смерти Танатосу и перевозчику душ умерших Харону. Такой же взгляд на природу сна отразился и в античной философии. Аристотель в дошедших до нас трактатах говорит о близости сна к состоянию смерти: «...сон же, по-видимому, принадлежит по своей природе к такого рода состояниям, как, например, пограничное между жизнью и не жизнью, и спящий ни не существует вполне, ни существует, ибо состоянию бодрствования жизнь присуща главным образом благодаря ощущению» [6].

Понимание сна как состояния, близкого к смерти, царило в умах европейцев до конца XIX века, что во многом задержало возникновение и замедлило развитие науки о сне. Однако на Востоке, в Индии и Китае, сон занимал более почетное место. Индийские религиозно-философские трактаты Веды и Упанишады, созданные неизвестными авторами, в течение многих веков передавались устно и, наконец, были записаны на санскрите на древесной коре и пальмовых листьях. В этих записях, чудом дошедших до наших дней, описывалось два вида сна — без сновидений (глубокий) и со сновидениями, причем сновидения рассматривались уже как отдельная форма сознания [7]. Такое понятие близко к со-



Асклепий врачует спящего пациента наложением рук. Барельеф, V в. до н.э. Археологический музей Пирея, Греция.



Ночь и двое ее сыновей — Сон и Смерть (фрагмент). Работа немецкого художника А.Я.Карстенса (конец XVIII в.). Веймар, Германия.

временным классификациям сна, выделяющим три функциональных состояния: бодрствование, медленный и быстрый сон*.

* Термины «медленный» и «быстрый» сон имеют около десятка пар синонимов (медленноволновый — быстроволновый; обычный, ортодоксальный — парадоксальный; сон без быстрых движений глаз — сон с быстрыми движениями глаз; телэнцефалический — ромбэнцефалический; спокойный — активированный и т.д.). Единой общепринятой англоязычной терминологии пока не выработано. Здесь мы используем парные русскоязычные термины, рекомендованные основателем отечественной «медицины сна» и физиологии сна человека А.М.Вейном.

Предвестники современной сомнологии

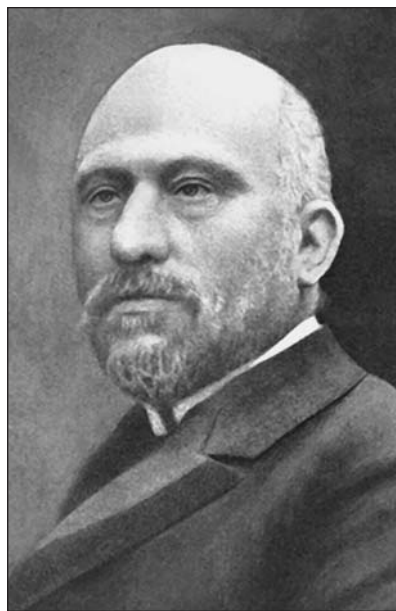
Хотя представление о родстве сна и смерти и задержало его изучение на столетия, еще в Средневековье велись некоторые рассуждения о причинах возникновения сна. В XII в. монахиня Хильдегарда из Бингена считала его сродни потреблению пищи и связывала с грехопадением Адама. В XVII—XVIII вв. причинами сна считали недостаток или избыток каких-либо основополагающих субстанций: недостаток «животного духа», расходующегося при физических нагрузках; нехватку «жизненного эфира», вызываемую утомлением; избыток «нервного духа», выделяемого во время бодрствования мозгом; сгущение крови, препятствующее току «духов», и т.д. [8].

В XIX в. мистические понятия постепенно стали уступать место физиологическим и химическим, но суть менялась не сильно. Приверженцы гемодинамической теории П.Кабанис и И.Мюллер связывали сон с застоем крови в мозге, а К.Бернар, А.Моссо и И.Р.Тарханов — с малокровием. Чешский анатом Я.Пуркинье полагал, что сон вызван приливом крови к нервным центрам, их опуханием, в результате чего проходящие через них волокна теряют проводимость и связь с другими отделами мозга. Выдвигались и еще менее правдо-

подобные теории. По одной из них, во время сна воспринимающие нейроны втягивают свои окончания, прерывая связь с внешним миром. Единственным, кто пытался доказать свою теорию, был Моссо. Он разместил человека на доске-весках и обнаружил, что при засыпании головной конец весов поднимается, а это свидетельствовало, казалось бы, об оттоке крови от головы. Однако изобретенный им же метод плетизмографии* показал, что наблюдаемый при засыпании подъем головной части весов обеспечивается притоком крови в конечности, а опускание при пробуждении — ее оттоком в брюшную полость, а вовсе не к голове. В свою очередь, перемещения массы крови в организме связаны с деятельностью симпатической нервной системы. При засыпании ее тонус снижается (сосуды рук и ног расширяются), а при пробуждении — повышается (сосуды конечностей сужаются) [9].

Следующим важным этапом в развитии сомнологии стало изучение депривации (лишения) сна. Одним из первых ученых такие эксперименты на животных провела наша соотечественница М.М.Манасеина** (1843—1903). По ее представлению, сон — необходимый процесс, присущий всем млекопитающим. В экспериментах она не давала спать щенкам, и примерно через пять бессонных суток они погибали. Манасеина подробно описала физиологические изменения в организме и макроанатомические признаки нарушения мозгового кровообращения и дегенерации клеток головного мозга.

Результаты Манасеиной, опубликованные в немецких и французских журналах в 1880—1890-х годах, имели широкий резонанс в европейском научном сообществе и вызвали целый ряд аналогичных работ. В них тоже были выявлены значительные изменения в ткани головного мозга животных после депривации сна. На современном уровне опыты по длительному лишению сна были впервые выполнены лишь в 1983 г., т.е. через 100 лет после Манасеиной, А.Рекшаффеном с сотрудниками. Они использовали методику «карусели», которая позволяла лишать крысу до 90% су-



Анджело Моссо.



К. фон Экономо.

точного времени сна. Такие опыты (их продолжат и в настоящее время уже следующее поколение ученых) подтвердили, что длительное лишение сна действительно приводит к гибели животных в течение нескольких недель. Причины тому — катастрофическое разрушение иммунной системы и развитие сепсиса [1].

В 1877 г. немецкий физиолог В.Прейэр впервые предположил, что во время бодрствования в организме накапливается некое гипотетическое вещество (он назвал его поногенным, от греч. *πονοζ* — нагрузка, утомление), приводящее к развитию сна и в процессе сна разрушающееся. Прейэр считал, что этим веществом могли быть креатинин или мочева кислота. После опубликования Манасеиной опытов по депривации сна предложенную ей методику стали использовать для подтверждения существования и поиска этого гипотетического «гипнотоксина». Р.Лежандр и А.Пьерон во Франции и К.Ишимори в Японии не только подтвердили значительные гистологические изменения в головном мозге депривированных собак, но и показали, что если их сыворотку крови перелить собаке, которая спала достаточно, то она вновь погружается в сон. Проводились многочисленные опыты по поиску и выделению гипнотоксина, но они так и не увенчались успехом***. По современным представлениям, наиболее вероятным кандидатом может быть аденозин, который выделяется при расщеплении основного источника энергии в клетке — аденозинтрифосфата (АТФ).

* Плетизмография — регистрация изменений объема части тела (головы или конечностей), связанных с изменениями количества крови, поступающей в обследуемый участок в ритме сердечной деятельности.

** Подробнее см.: Ковальзон В.М. Забытый основатель биохимии и сомнологии // Природа. 2012. №5. С.85—89.

*** Подробнее см.: Ковальзон В.М. Поиски «гормона сна» // Природа. 1983. №4. С.13—21.

Примерно в те же годы был описан «центр сна», что доказывало участие головного мозга в механизмах этого процесса. Во время Первой мировой войны австрийский невролог К. фон Экономо, исследуя мозг больных, умерших от инфекционного летаргического энцефалита, предположил, что в гипоталамусе существуют «центр сна» и «центр бодрствования» [1]. Это предположение подтвердил в 1924 г. швейцарский физиолог В.Р.Гесс в опытах по электрической стимуляции таламуса и гипоталамуса: раздражение таламуса слабым током вызывало у кошки сон, а более сильным — возбуждение. Работы Гесса по функциональной организации промежуточного мозга были удостоены Нобелевской премии в 1949 г.

Рождение современной сомнологии

Несмотря на блестящие работы Манасеиной, в начале XX в. сон как важный процесс, заслуживающий изучения ничуть не меньше, чем бодрствование, все еще не был признан. Так, великий физиолог И.П.Павлов продолжал считать сон «состоянием разлитого коркового торможения». Надо сказать, что такое чисто интуитивное понимание природы сна не расходится с новейшими экспериментальными данными, но только в отношении медленноволновой фазы [1].

Среди пионеров изучения сна в «доэлектроэнцефалографическую эру» необходимо отметить Н.Клейтмана, уроженца Кишинева, волею судьбы оказавшегося в США в годы Первой мировой войны. Его работа по изучению последствий депривации сна на себе самом поразила в свое время самого Павлова! Клейтман увлекся проблемой сна в то время, когда эта тема, кажется, еще никого не интересовала. В вышедшей в 1939 г. энциклопедической монографии «Sleep and Wakefulness» («Сон и бодрствование») он впервые сформулировал концепцию существования «основного цикла покоя—активности». Эта гипотеза (автор считал ее своим крупнейшим научным достижением) намного опередившая время, в последние десятилетия получила многочисленные подтверждения в исследованиях на людях и экспериментах на животных. Сейчас концепция Клейтмана составляет основу одного из наиболее плодотворных и бурно развивающихся направлений в психофизиологии — изучении внутрисуточных биоритмов человека. Теперь можно считать доказанным, что помимо 25-часового, «циркадианного», всю нашу жизнь пронизывает полуторачасовой «диурнальный» ритм, определяющий днем чередование сонливости и бодрости, голода и жажды, а ночью — смену медленного и быстрого сна.

В России и СССР пионером в изучении физиологии сна был ученик Павлова, основатель ростовской школы физиологов Н.А.Рожанский.

В 1913 г. он защитил в Санкт-Петербурге диссертацию «Материалы к физиологии сна», ставшую результатом экспериментов на собаках. В ней и в дальнейших публикациях он высказал новое представление о бодрствовании и сне как о сложнейших биологических рефлексах «с эффектом разлитого *понижения* порогов раздражения при бодрствовании, либо разлитого торможения, т.е. *повышения* порогов раздражения в сонном состоянии». Рожанский был также пионером в изучении сна птиц. На основе собственных экспериментов и работ своих сотрудников он пришел к выводу, что существуют отдельно центр сна и центр бодрствования, расположенные в подкорково-стволовой части мозга, так как эти рефлексы сохраняются и у бесполушарных птиц [11]. Необходимо отметить также забытую, но недавно обнаруженную И.Н.Пигаревым работу К.М.Быкова. Он вместе с коллективом сотрудников провел в 30-х годах обширное (к сожалению, долгое время оставшееся неизвестным) исследование последствий депривации сна у собак [12].

Развитие сомнологии тормозилось отсутствием метода, позволяющего изучать сон. О том, спит человек или нет, удавалось судить лишь по косвенным признакам (позе, изменению частоты пульса и дыхания, температуре тела), а определить глубину сна, не разбудив спящего, было невозможно. По той же причине состояние естественного сна ошибочно принимали за нечто сходное с гипнозом, комой, зимней и летней спячкой (гибернацией).

Основой для объективной регистрации сна и ключевым событием в истории всех нейронаук стало изобретение в 1928 г. немецким психиатром Г.Бергером метода регистрации биопотенциалов головного мозга — электроэнцефалографии. Однако вначале открытие восприняли с большим недоверием, поскольку потенциалы эти имеют столь малую амплитуду, что их можно легко спутать с помехами, регистрируемыми примитивными тогда оборудованием. Поэтому метод Бергера признали лишь через несколько лет (в 1934 г.), когда известные физиологи Э.Эдриан и Б.Мэтьюс подтвердили его результаты.

Бергер впервые описал различия в электроэнцефалографических ритмах бодрствующего и спящего человека, что стало переломной точкой в развитии сомнологии. Объективным изучением сна заинтересовались американские ученые из Гарвардского и Чикагского университетов. В 1937—1939 гг. был опубликован ряд статей, описывающих основные феномены сна, такие как «сонные веретена» и дельта-волны. В 1937 г. А.Лумис, Е.Харви и Дж.Хобард впервые обратили внимание на непостоянство электроэнцефалографической картины сна и создали первую классификацию его стадий. Много позднее (в 1976 г.) важность объективного изучения подтвердила и М.Карскадон, впервые четко показав расхождение реальной продол-

жительности сна с субъективными ощущениями пациентов.

Появление электроэнцефалографии привело к целому ряду открытий в изучении сна. В 1937 г. Ф.Бремер в Брюсселе в знаменитых опытах на изолированном мозге кошки показал, что при перерезке на более низком уровне (когда связи между большей частью ствола и полушариями головного мозга остаются незатронутыми) сохраняется чередование картин сна и бодрствования, а на более высоком — мозг впадает в состояние «беспробудного» сна (на самом деле — комы, см. рис.).

Изначально эти работы были ошибочно интерпретированы — мозг засыпает из-за снижения притока импульсов от органов чувств. Объяснить истинную причину наступления сна у кошек Бремера помогли опыты Дж.Моруцци и Х.Мэгуна, выполненные в 1949 г. Они подтвердили, что переход от сна к бодрствованию проявляется десинхронизацией (электрическая активность мозга меняется от высокоамплитудных низкочастотных ритмов глубокого сна к низкоамплитудным быстрым ритмам при бодрствовании), которая запускается определенной структурой, расположенной в стволе головного мозга, — ретикулярной формацией. В последующих работах выяснилось, что, хотя эта структура активируется афферентными стимулами (от органов чувств), ее повреждение приводит к непрерывному глубокому сну (коме, как в исследовании Бремера). Так была открыта ретикулярная восходящая активирующая система — специальная структура, отвечающая за поддержание бодрствования. Вначале она считалась диффузной, но, по данным современной сомнологии, представляет собой десяток конкретных скоплений тел нервных клеток («центров бодрствования», которые находятся «внутри» системы восходящей активации), выделяющих различные химические передатчики [1—4].

Открытие быстрого сна

К середине XX в. многие физиологи полагали, что вопросы феноменологии и механизма сна в основном уже разгаданы. О цикличности ночного сна они не догадывались, так как из-за экономии бумаги электроэнцефалограммы во время сна записывались либо в начале ночи, либо урывками на протяжении немногих минут несколько раз за ночь. Да и перспектива бодрствовать всю ночь,



Н.А.Рожанский.



Г.Бергер.

регистрируя сон испытуемого, мало кого привлекала. Однако во второй половине XX в. произошло еще одно великое событие в сомнологии: была обнаружена (и в последующем интерпретирована как отдельное функциональное состояние) фаза быстрого сна.

Наш коллега И.Н.Пигарев говорит: «Не столь уж важно, кто совершил то или иное открытие *первым*; гораздо важнее, кто совершил его *последним!*». Открытие Американского континента, например, как теперь хорошо известно, происходило на протяжении веков неоднократно и до, и после Колумба. Последним в ряду «первооткрывателей» был Америго Веспуччи — в честь него эта часть света и названа.

Эта аналогия полностью относится и к истории открытия быстрого сна. Подобное состояние наблюдалось неоднократно у животных, в том числе у людей. Такими «первооткрывателями», интуитивно чувствующими, что «внутри» сна есть особые периоды, которые у домашних животных сопровождаются выраженными мышечными подергиваниями, а у людей — переживанием ярких, эмоционально окрашенных сновидений, были римский поэт Лукреций (I в. до н.э.), французский врач Ж.Фернель (1554), итальянский натурфилософ Ф.Фонтана (1765) и др. Однако их разрозненные наблюдения оставались вне поля зрения натурфилософов, врачей и вообще европейской читающей публики, которая явно или неявно находилась под влиянием аристотелевских представлений о сне как о маргинальном и пассивном состоянии (см. также: [13]).

Особую роль в открытии быстрого сна в XX в. сыграли советские исследователи М.П.Денисова

и Н.Л.Фигурин. В 1926 г. они впервые описали у детей (в возрасте от двух месяцев до двух лет) движения глазных яблок каждые 50 минут, учащенное дыхание и сниженную общую двигательную активность [14]. Работа эта заинтересовала профессора физиологии Чикагского университета Клейтмана. Он упомянул о ней в своей монографии 1939 г., а через много лет, в начале 1950-х годов, после появления первых электроэнцефалографов, поручил своему аспиранту Ю.Азеринскому проверить эти данные.

Сначала Азеринский пытался зарегистрировать движения глаз у собственного сына с помощью кинокамеры, но ее стрекотание мешало тому спать. Тогда он разработал новый метод для регистрации движений глаз (электроокулографию, ЭОГ) и исследовал ночной сон детей и взрослых. Метод регистрации движений глаз позволил исследователям отличить *быстрые* движения глаз от *медленных*, присущих засыпанию. В основе работ лежала гипотеза Клейтмана, согласно которой движения глаз помогут отличить поверхностный сон от глубокого. Сами Азеринский и Клейтман интерпретировали полученные результаты в своей знаменитой статье, вышедшей в свет в 1953 г. [15].

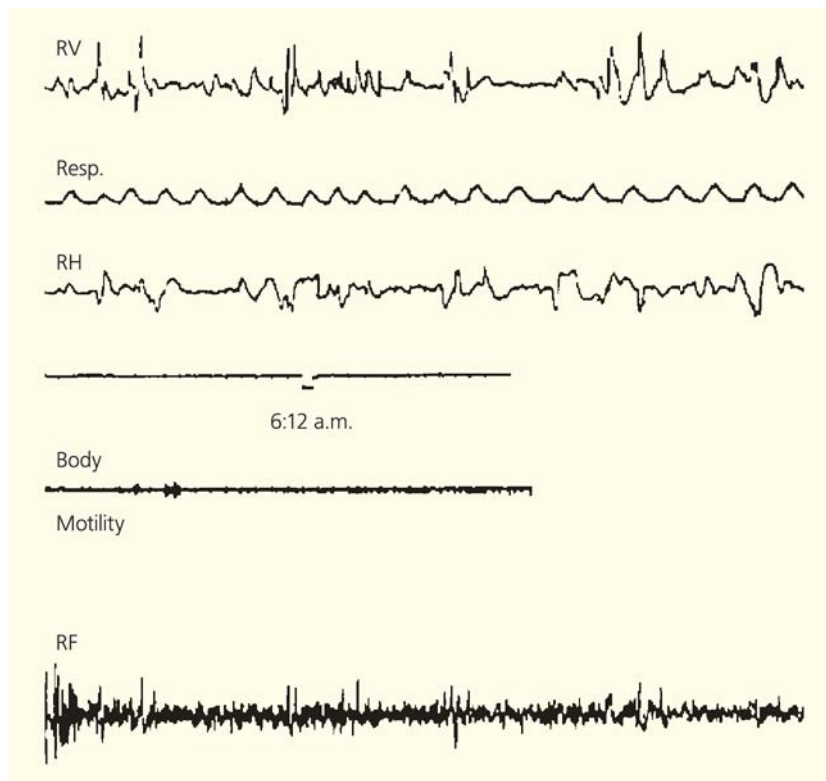
Интересно, что Клейтман, отличавшийся исключительной научной добросовестностью, вначале не поверил Азеринскому и заподозрил, что тот «подгоняет» свои результаты под рабочую гипотезу! Он привел в лабораторию свою дочь, записал у нее ЭЭГ и ЭОГ во время ночного сна и убедился, что быстрые движения глаз действительно периодически появляются [15].

Однако это еще не было открытием нового состояния — лишь обнаружением периодически возникающих вспышек необычных движений глаз у некоторых испытуемых (не было ясно даже, у всех ли!) во время ночного сна. Открытие сна с быстрыми движениями глаз произошло через несколько лет, и связано оно с именем другого аспиранта Клейтмана, В.Демент. Именно он впервые непрерывно записал электроэнцефалограммы сна 33 человек в течение всей ночи. На основании таких регистраций было установлено, что после засыпания электроэнцефалографические признаки постепенно изменяются в сторону глубокого сна, но примерно через час-полтора возникает первый эпизод сна с быстрыми движениями глаз. Затем такие циклы повторяются несколько раз в течение ночи, и длительность их составляет

в среднем 90–100 мин. Продолжительность этих эпизодов и интенсивность быстрых движений глаз нарастают от вечера к утру.

Таким образом, были описаны все основные характеристики ночного сна человека. За последующие полвека бурного развития сомнологии убедительно показано, что эти закономерности присущи абсолютно всем людям на Земле, без единого исключения, и не зависят от возраста, пола, расы, индивидуальных физиологических и психологических характеристик. По наличию движений глаз Клейтман, Азеринский и Демент расценили описанное ими состояние как поверхностный сон и назвали его stage 1 REM (англ. *rapid eye movement*), т.е. стадия дремоты с быстрыми движениями глаз.

Эти исследователи также были первыми, кто связал такой сон со сновидениями. На эту мысль их натолкнула нерегулярная частота дыхания и сердечного ритма, которую они наблюдали в этом состоянии. Для проверки своего предположения они будили испытуемых и спрашивали, видели ли они сны. Оказалось, что если чело-



Первая запись сна с быстрыми движениями глаз у человека — 10-секундный отрезок [15]. Сверху вниз: RV — электроокулограмма (ЭОГ) вертикальное отведение от правого глаза; Resp. — дыхание; RH — ЭОГ, горизонтальное отведение от правого глаза; 6:12 a.m. — отметка времени; Body Motility — двигательная активность тела; RF — правая лобная электроэнцефалограмма (ЭЭГ). Калибровка: 200 мкВ для ЭОГ, 50 мкВ для ЭЭГ.

века будить из состояния сна с быстрыми движениями глаз, то он обычно описывает красочные эмоционально-насыщенные сюжетные истории. А при пробуждениях из сна без быстрых движений глаз такие ответы были редкостью. Иногда испытуемый рассказывал о неярких, неэмоциональных видениях.

По-видимому, первым, кто адекватно описал быстрый сон у подопытных животных, был Р.Клауэ, аспирант известного немецкого нейрофизиолога А.Корнмюллера. Еще перед Второй мировой войной, в 1937 г., он опубликовал на немецком языке статью с результатами (полученными с помощью игольчатых электродов) электрической активности головного мозга и мышц шеи при естественном сне подопытных кошек. Клауэ описал две стадии сна и назвал их «стадия 1» (легкий сон, сопровождаемый медленными волнами в ЭЭГ и снижением мышечного тонуса) и «стадия 2 (глубокий сон с уплощенной ЭЭГ, исчезновением мышечного тонуса и подергиванием конечностей).

Ничего не зная о работе Клауэ, советский нейрофизиолог Л.Р.Ципуридзе (к сожалению, безвременно умерший), ученик главы грузинской физиологической школы И.С.Бериташвили, описал стадии «спокойного» и «беспокойного» сна по ЭЭГ и поведению подопытных кошек [16]. Лишь через полвека текст этой пионерной статьи был переведен на английский язык, однако найти ее в Интернете нам не удалось.

Демент ничего не знал о работе Клауэ, а тем более о работе Ципуридзе и не владел методикой вживления хронических внутримозговых электродов подопытным животным. Тем не менее, он тоже попытался записать ЭЭГ кошки с помощью игольчатых электродов, воткнутых в скальп. Однако записать ЭЭГ у бодрствующей кошки таким методом оказалось невозможно из-за мощной мышечной активности, «маскирующей» более слабую электрическую активность коры мозга. Но когда кошка засыпала, мышечная активность спадала, и ЭЭГ становилась видна. Так Дементу удалось показать, что периоды уплощения ЭЭГ и «дергания» глазных яблок регулярно появляются и во сне кошек и сочетаются с подергиваниями лап и вибрисс. Однако Демент не придавал достаточного значения полному исчезновению электромиограммы (ЭМГ) в этом состоянии и не смог правильно оценить пороги пробуждения у испытуемых-добровольцев и подопытных кошек, отчего продолжал считать открытую им стадию «легким», поверхностным сном. Они с Клейтманом называли ее также «эмергентной» (внезапно возникающей) стадией 1, в отличие от «нисходящей» стадии 1, закономерно возникающей в начале сна [17].

Известны и некоторые другие авторы, описавшие эпизоды уплощения ЭЭГ у спящих кошек, но расценившие их как периоды кратковременного пробуждения. Среди таких исследователей — американский физиолог А.Дж.Дербишир с соавто-

рами (1936) и, что еще удивительнее, группа швейцарских исследователей (1953), в которую входили сын нобелевского лауреата В.Гесса Р.Гесс-младший и будущий основатель и первый президент Европейского общества по изучению сна В.Кёлла!

Последним в ряду «первооткрывателей» быстрого сна был М.Жуве*, именно он, наконец, осознал необычайную важность этого открытия. Он первым понял, что сон с быстрыми движениями глаз — не просто одна из стадий обычного (медленноволнового сна), а отдельное функциональное состояние. Жуве сформировал современное представление о трех принципиально различных состояниях организма: ортодоксальном (обычном) сне, парадоксальном и бодрствовании. Парадоксальной он назвал фазу сна с быстрыми движениями глаз потому, что она характеризуется сочетанием высочайшей активности мозга и полного расслабления скелетных мышц, представляя собой, по его мнению, «активное бодрствование, направленное внутрь» [1].

В 1959 г. Жуве вместе со своими сотрудниками опубликовал небольшую статью на французском языке, в которой описал мышечную атонию у кошек, сопровождающую периоды сна с уплощенной ЭЭГ и быстрыми движениями глаз. Таким образом, была выявлена необходимость регистрировать мышечную активность — последнюю из трех составляющих, обязательных для разделения бодрствования и различных фаз и стадий сна. Сейчас при полисомнографии (регистрации сна) регистрируют электроэнцефалограмму (ЭЭГ), электроокулограмму (ЭОГ) и электромиограмму (ЭМГ).

Все первооткрыватели быстрого сна в XX в. столкнулись с полным непониманием и неприятием их результатов со стороны не только рядовых, но и выдающихся коллег-нейрофизиологов. Было хорошо известно, что быстрые низкоамплитудные ритмы в ЭЭГ — это бодрствование, а большие медленные волны — сон. Если десинхронизация возникает во время сна — это означает кратковременное пробуждение. Открытие быстрого сна противоречило концепции восходящей ретикулярной активирующей системы, только недавно воспринятой всеми нейрофизиологами, и означало полный крах всех старых идей относительно пассивной природы сна. Никто не мог ни понять, ни принять новой революционной парадигмы. Так, работа Клауэ не была отмечена ни Бремером в Бельгии, ни будущим нобелевским лауреатом Гессом в Швейцарии, ни Моруцци в Италии, ни Мэгуну в США. И вообще никем из исследователей мозга того времени!

Демент долго не мог опубликовать свою работу на кошке. Его сотрудник (Демент в мемуарах не приводит его фамилии) отказался от соавторства

* См. также: Ковальзон В.М. Необычайные приключения в мире сна и сновидений // Природа. 2000. №1. С.12—20.

в статье, пять научных журналов последовательно отвергли рукопись. Наконец, выдающийся невролог Г.Джаспер, оценив результаты клейтмановского аспиранта, принял статью без рецензии, на свой страх и риск, как главный редактор журнала «EEG and Clinical Neurophysiology» (Вряд ли такой поступок был бы возможен в наши дни!). А когда Жуве показал свои записи Бремеру, тот высмеял его, заявив, что у него «плавает» усиление электроэнцефалографа! Лишь на Лионском симпозиуме, состоявшемся в 1963 г., был достигнут «консенсус» между крупнейшими американскими и европейскими специалистами относительно открытия, сделанного Дементом в США и Жуве во Франции несколькими годами ранее. К тому времени феномен быстрого сна получил независимые подтверждения в лабораториях Дж.Эвартца и будущего нобелевского лауреата Д.Хьюбела.

Жуве в одной из своих статей писал, что над всеми американскими нейрофизиологами тогда довели догматы психоанализа, т.е. идея Фрейда об «охранительной» роли сновидений, препятствующих преждевременному пробуждению. Эта ложная идея не давала возможности непредвзято взглянуть на реальную картину «сна со сновидениями». Продолжая эту мысль, можно сказать, что над всеми сомнологами (до Жуве) довели аристотелевские догматы, и Манасейна, по всей видимости, была первой, а сам Жуве — последним, кто

сделал шаг к освобождению от них. Поэтому Жуве по праву считается крупнейшим сомнологом второй половины XX в.

Сегодня сомнология, несмотря на свою непродолжительную историю, имеет большое количество направлений и сфер изучения. Она включает не только фундаментальные аспекты исследований в области физиологии, нейробиологии, генетики сна и суточных (циркадианных) ритмов, но и практические. Знания, полученные в исследованиях ритма «сон-бодрствование», активно применяются для планирования графиков рабочих смен и расписаний перелетов; должны также привлекаться для решений вопросов об исчислении времени (отмене или введении перевода часов на летнее время, изменении часовых поясов и т.д.) [18].

Отдельная область — медицина сна — занимается диагностикой и лечением всех его расстройств. К ним, помимо широко известных инсомнии (бессонницы) и снохождения (одного из видов так называемых парасомний), относятся периодические движения конечностей во сне, синдром «беспокойных ног», нарушения циркадианных ритмов и поведения в фазе быстрого сна; гиперсомния (повышенная дневная сонливость), а также апноэ — синдром остановок дыхания, часто сопровождающийся храпом. Об этом заболевании и пойдет речь в нашей следующей статье. ■

Литература

1. Ковальзон В.М. Основы сомнологии. Физиология и нейробиология цикла бодрствование—сон. М., 2011.
2. Ковальзон В.М. Центральные механизмы регуляции цикла бодрствование—сон // Физиология человека. 2011. Т.37. №4. С.124.
3. Петров А.М., Гиниатуллин А.Р. Нейробиология сна: современный взгляд: Учебное пособие. Казань, 2012.
4. Ковальзон В.М. Мозг и сон: от нейронов — к молекулам // Журн. высш. нервн. деят. 2013. Т.62. №1. С.48.
5. Фрэзер Дж. Золотая ветвь: исследование магии и религии / Пер. с англ. М.К.Рыклиной. М., 2001.
6. Аристотель. О возникновении животных / Пер. В.В.Карпова. М.; Л., 1940. С.192.
7. Лысенко В.Г. Сон и сновидение как состояния сознания: Упанишады и Шанкара (<http://kogni.ru/text/dream.pdf>).
8. Борбели А. Тайна сна / Пер. В.М.Ковальзона. М., 1989.
9. Вейн А.М. Три трети жизни. М., 1979.
10. Лежандр Р., Пьерон А. Исследование потребности во сне после продолжительного бодрствования // Физиология сна. М., 1928. С.113—123.
11. Буриков А.А. Механизмы сна и бодрствования (как и зачем спит мозг?) // Когановские чтения. Ростов-на-Дону, 2012.
12. Быков К.М. Изменения в организме животного при длительном лишении сна. Избранные произведения. Т.3. М., 1958. С.63—98.
13. Жуве М. Замок снов / Пер. В.М.Ковальзона. Фрязино, 2006.
14. Ковров Г.В. К вопросу об истории открытия быстрого сна // Актуальные вопросы сомнологии: Тезисы докладов. М., 2000. С.48.
15. Aserinsky E., Kleitman N. Regularly occurring periods of eye motility, and concomitant phenomena, during sleep // Science. 1953.V.118. P.273—274.
16. Цкинтуридзе Л.Р. Электрическая деятельность коры больших полушарий нормальной кошки во время естественного сна // Труды Института физиологии им.И.С.Бериташвили АН ГССР. 1950. Т.8. С.209—225.
17. Dement W.C. The paradox of sleep: the early years // Archives Italiennes de Biologie. 2004. V.142. P.333—345.
18. Ковальзон В.М., Дорохов В.Б. По поводу нового исчисления времени // Природа. 2012. №7. С.65—66.
19. Siegel J.M. REM sleep // Principles and Practice of Sleep Medicine / Eds M.H.Kryger, T.Roth, W.C.Dement. St. Louis, 2011. P.92—111.

Судьба первых советских геофизиков

В.И.Костицын,

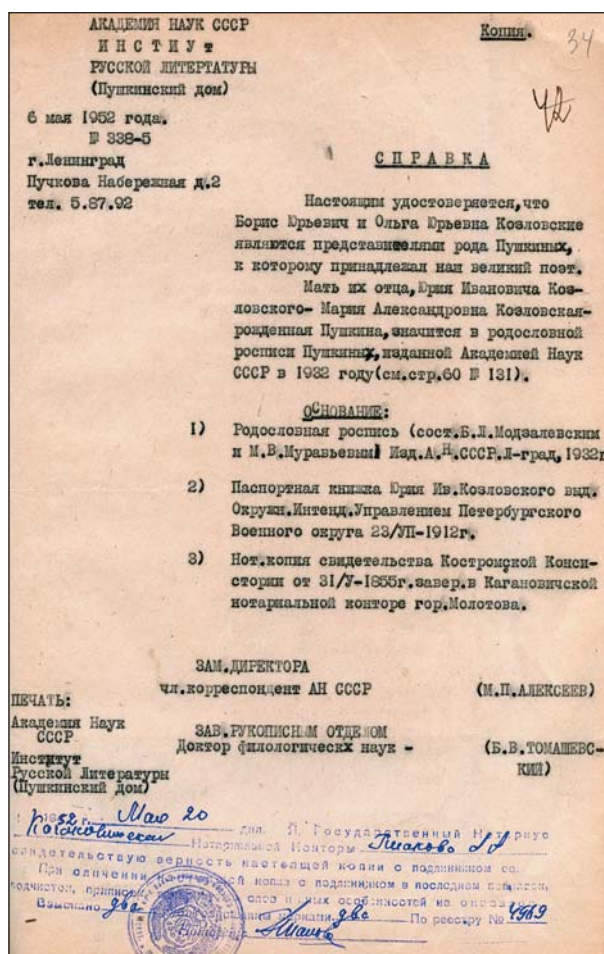
доктор технических наук

Пермский государственный национальный исследовательский университет

В ходе подготовки к 50-летию кафедры геофизики Пермского государственного университета в 2004 г. мое внимание привлекла краткая фраза профессора А.К.Маловичко, касающаяся истории основания кафедры: «Для постоянной работы был привлечен известный гравиметрист Б.Ю.Козловский, но вскоре он умер». Больше о нем ничего не было известно. Тогда я обратился в архив университета с надеждой, что может какие-то сведения о нем имеются. К моему удивлению, его личное дело сохранилось. Вот что удалось узнать из документов [1].

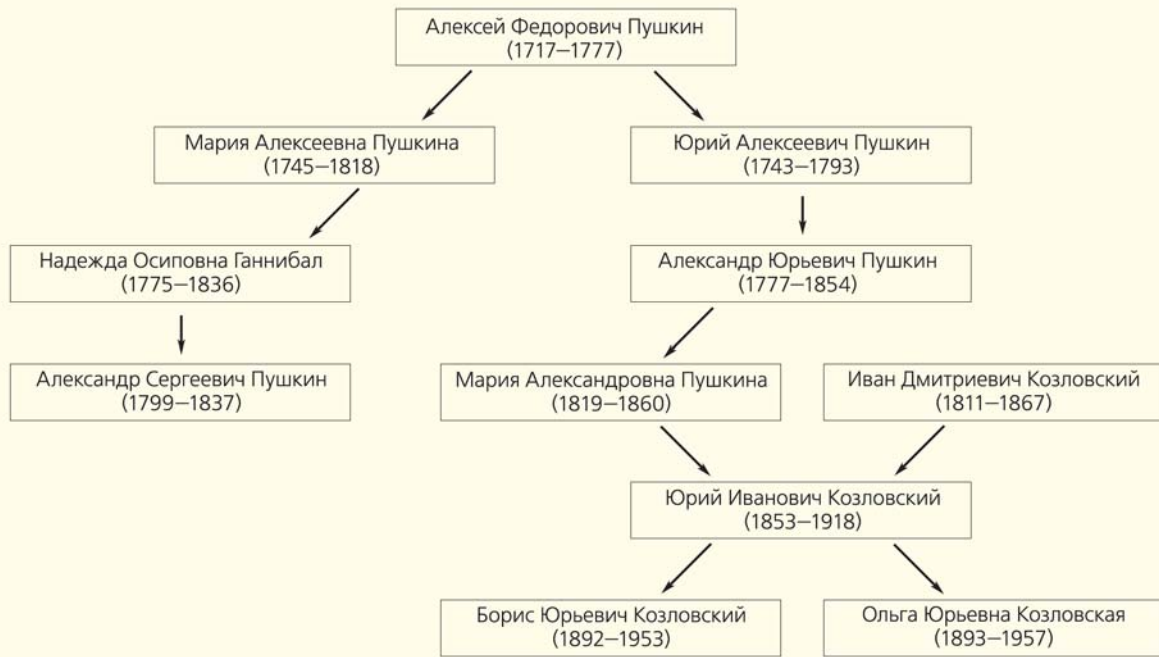
Борис Юрьевич Козловский родился 26 августа (по новому стилю 8 сентября) 1892 г. в Москве. Отец — Юрий Иванович Козловский, дворянин, князь, по матери внучатый племянник А.С.Пушкина. В справке из Института русской литературы (Пушкинского дома) АН СССР от 6 мая 1952 г. сообщалось: «Настоящим удостоверяется, что Борис Юрьевич и Ольга Юрьевна Козловские являются представителями рода Пушкиных, к которому принадлежал наш великий поэт. Мать их отца, Юрия Ивановича Козловского, — Мария Александровна Козловская, рожденная Пушкина, — значится в родословной росписи Пушкиных, изданной Академией наук СССР в 1932 году».

В 1917 г. Борис Юрьевич окончил астрономическое отделение физико-математического факультета Петроградского университета и был оставлен на кафедре астрономии и геодезии для преподавательской деятельности. В марте 1919 г. перевелся в Главное гидрографическое управление, а затем в Управление по обеспечению безопасности кораблевождения по Балтийскому морю, где проводил наблюдения по определению силы тяжести. С 1920 г. назначен научным сотрудником Астрономического института и в течение 13 лет был бессменным редактором первого в России точного Астрономического ежегодника. Летом 1924 г. участвовал в работах Северной экспедиции Главного гидрографического



Справка от 6 мая 1952 г., полученная Козловскими из Пушкинского дома.

управления на Новой Земле в должности астронома и геодезиста. С 1925 по 1932 г. — организатор и руководитель геодезических работ треста «Эмбанефть». Кроме того, с 1925 по 1927 г. заведовал гравиметрическим кабинетом Геолкома (Ленинград).

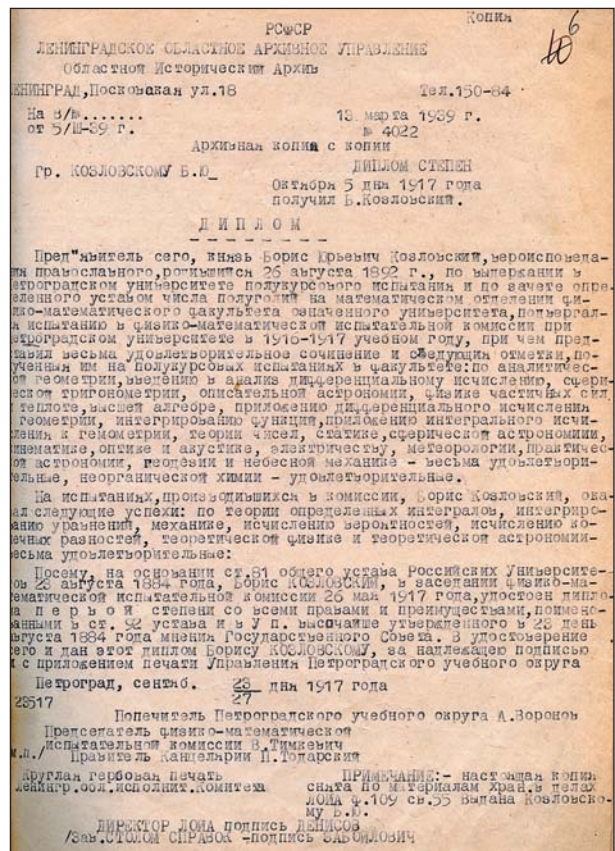


Родословная связь А.С.Пушкина, Б.Ю. и О.Ю.Козловских (схема составлена автором).

С 1932 г. Козловский заведует геофизическим сектором Ленинградского отделения нефтяного геологоразведочного института, а с 1933 г. — гравиметрическим кабинетом Московского отделения нефтяного геологоразведочного института. В 1933 и 1934 гг. — по совместительству доцент Московского геологоразведочного института (МГРИ), читает лекции по гравиметрии. Но 2 декабря 1934 г. его арестовывают, а 25 февраля 1935 г. он осужден ОСО НКВД* по ст.58 п.10 УК** сроком на 5 лет.

* Особое совещание при НКВД СССР — внесудебный орган, имевший полномочия рассматривать уголовные дела по обвинениям в общественно опасных преступлениях и выносить приговоры (о тюремном заключении, ссылке или высылке обвиняемых, а также о применении других мер наказания) по результатам расследования, а также пересматривать решения Военной коллегии Верховного суда СССР. — *Примеч. ред.*

** Статья 58 Уголовного кодекса РСФСР 1922 г. вступила в силу 25 февраля 1927 г. для противодействия контрреволюционной деятельности. Была несколько раз пересмотрена. Редакция от 8 июня 1934 г. гласила: «58-10. Пропаганда или агитация, содержащая призыв к свержению, подрыву или ослаблению Советской власти или к совершению отдельных контрреволюционных преступлений (ст.58-2—58-9), а равно распространение или изготовление или хранение литературы того же содержания влекут за собой лишение свободы на срок не ниже шести месяцев. Те же действия при массовых волнениях, или с использованием религиозных или национальных предубеждений масс, или в военной обстановке, или в местностях, объявленных на военном положении: наказание аналогично статье 58-2». — *Примеч. ред.*



Копия диплома, выданного 5 октября 1917 г., об окончании Б.Ю.Козловским Петроградского университета.

Во время заключения работал по специальности, проводя геофизическую разведку (электроразведку и каротаж) на Крайнем Севере в Ухтинском режимном лагере. После досрочного освобождения в октябре 1938 г. остался работать в Ухте по вольному найму в должности старшего геофизика, так как разрешения на возвращение в Москву или Ленинград не имел. Об этом удалось узнать из сохранившегося рапорта начальника геолого-топографического отдела Ухтижемлага НКВД, который следует привести полностью.

*Начальнику Управления
Ухтижемлага НКВД
старшему майору госбезопасности
т. Цесарскому*

Рапорт

На днях освобождается геофизик Козловский Б.Ю., руководивший гравиметрической партией на Крутой. Товарищ Козловский Б.Ю. представляет весьма крупного специалиста по гравиметрии, принимавший деятельное и видное участие в организации гравиметрических работ в СССР. Кроме того, он хорошо знаком с электроразведкой. Как человека, проработавшего уже около 5 лет с большой пользой для дела, прошу

Вашего разрешения оставить Козловского Б.Ю. в качестве вольнонаемного сотрудника геолого-топографического отдела Ухтижемлага НКВД.

Начальник ГТО Н.Тихонович
22.10.1938 г.*

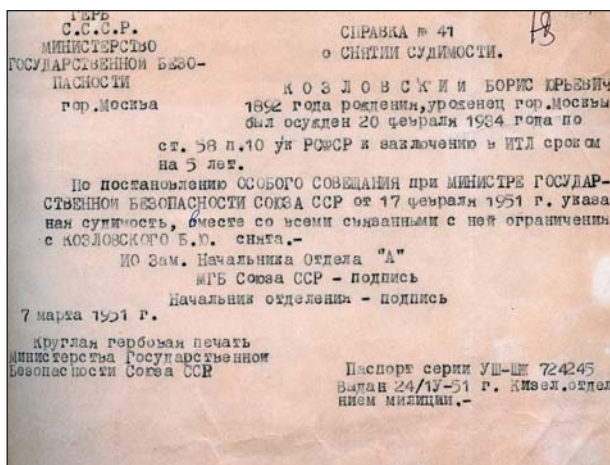
В 1940 г. Козловский переходит на работу в систему Наркомугля. С марта 1940 г. по март 1943-го он старший геофизик треста «Южуралуглеразведка» в г.Чкалове (ныне Оренбург), выполняет комплексные геофизические работы (электроразведку и магнитометрию), а также руководит съемкой угольных месторождений в Казахстане и Челябинской области. С апреля 1943 г. переведен в Пермскую область, в трест «Кизелуглеразведка», для организации и руководства геофизической разведкой. Работал в должности начальника

* По информации, полученной от Е.А.Зеленской (Ухта), Н.Н.Тихонович — известный в СССР геолог, до 1938 г. включительно руководил геолого-разведочными работами в Коми, осужден 18 ноября 1928 г. Приговорен к «смертной казни с заменой на 10 лет исправительных работ». Возглавил геологическую службу Ухтинской экспедиции ОГПУ; в 1931 г. заключение в концлагерь было заменено «прикреплением» к лагерю до конца срока, а потом — и свободой [2].



Б.Ю.Козловский со студентами геологического факультета Пермского государственного университета, осень 1952 г.

Фото А.С. Зуева



Справка о снятии судимости с Б.Ю.Козловского.

и главного инженера геофизической партии, которая несколько раз получала Красное знамя треста «Кизелуглеразведка», а осенью 1944 г. — Красное знамя Союза угольщиков СССР.

Борис Юрьевич награжден медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.». С 1945 по 1951 г. преподавал в Ки-



Памятник на могиле известного геофизика Б.Ю.Козловского и его сестры О.Ю.Козловской, установленный 6 июля 2013 г. на Егошихинском кладбище (Пермь).

Фото Н.М.Ржевитиной

зеловском горном техникуме, где читал курсы по математике, геофизике и геодезии. С 1946 по 1947 г. работал одновременно инженером-геодезистом в производственной Кизеловской топографической экспедиции.

С 1 сентября 1951 г. Козловский зачислен на должность старшего преподавателя по геофизике на кафедру геодезии и черчения Пермского государственного университета, так как кафедры геофизики еще не было. Но он читал лекции и проводил лабораторные занятия со студентами геологического факультета по основным геофизическим дисциплинам в соответствии с вновь открытой в 1951 г. специальностью «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых».

Руководство Пермского государственного университета планировало в дальнейшем назначить его заведующим кафедрой геофизики (о чем свидетельствуют упоминания в отдельных документах), но, к сожалению, он, проработав лишь около двух лет, скончался в апреле 1953 г. Похоронен в г. Перми на Егошихинском кладбище.

Научные работы Бориса Юрьевича в период с 1921 по 1929 г. посвящены определению силы тяжести в северо-западных областях Союза и по берегам Балтийского моря, гравитационным наблюдениям и астрономическим определениям в Эмбенских степях, маятниковым наблюдениям в СССР. Статья «Результаты гравитационных наблюдений 1927—1928 гг. в Эмбенском районе» в соавторстве с выдающимся геофизиком Б.В.Нумеровым была опубликована в 1929 г в «Докладах Академии наук СССР». В ней отмечалось: «...минимумы силы тяжести в Эмбенском районе соответствуют поднятию древних пород (пермотриас), а появление нефтеносности всюду имеет место на одном из крыльев купола. По-видимому, большей отрицательной аномалии соответствует наибольшее приближение соли». Как сейчас известно, этот район богат месторождениями соли и нефти. С соляными структурами Прикаспия связаны крупные газоконденсатные и нефтяные месторождения, располагающиеся в породах, перекрывающих соляные массивы.

Ухтинским геофизикам и геологам хорошо известны исследования Козловского по Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. В материалах Государственного геологического предприятия «Печорагеофизика» (ныне ОАО «Севергеофизика») читаем: «В 1935—1936 гг. работают две геофизические партии: одна электроразведочная (начальник — Стариченко Денис Николаевич) и одна гравиразведочная (начальник — Козловский Борис Юрьевич). Обе эти партии входили в состав Печорского треста НКВД. Это время считается началом геофизических исследований в Коми Республике».

Вклад геофизика Козловского очевиден не только в исследования Прикаспия, Тимано-Печор-

ской нефтегазоносной провинции, но и Оренбургской, Челябинской и Пермской областей. Имя его должно быть известно и нынешним исследователям недр.

Благодаря усилиям Пермского отделения Евро-Азиатского геофизического общества (председатель А.В.Шумилов), кафедры геофизики Пермского государственного национального исследовательского университета, которой я заведу, и общества «Пермский краевед» (председатель В.Ф.Гладышев) в 2013 г. — через 60 лет после кончины Бориса Юрьевича — на Егошихинском кладбище в Перми установлен новый памятник ему и его сестре Ольге Юрьевне Козловской (1893—1957). Автором памятника является ижевский скульптор Д.Б.Постников. Освящение провел настоятель Всехсвятского храма в Перми, протоиерей, доктор исторических наук Алексей Марченко.

* * *

Следующим открытием для меня стала переданная профессором Уральского горного университета В.В.Филатовым копия трудов I Всесоюзной геофизической конференции. В библиотеке Пермского государственного университета мне удалось найти оригинал ее трудов [3]. Конференция состоялась на Урале (в Свердловске) более 80 лет назад (22—27 марта 1932 г.). В ее работе принял участие и Козловский — с докладом «О маятниковых наблюдениях в СССР и о геофизических работах Ленинградского нефтяного института в 1931 г.». Он представлял Ленинградский астрономический институт.

Анализируя труды конференции, убеждаешься, что они не устарели: ни в вопросах стратегии развития геофизических методов, ни в поставленных геологических задачах, ни по постановке масштабных исследований в области геофизики, ни по глубине обсуждения результатов геофизических исследований. Заслуживают внимания оптимистичный геофизический общественности начала XX в. в решении геологических задач и широкий спектр рассматриваемых проблем. По широте охвата и полноте изложения труды конференции не только носят историко-познавательный характер, но и являются прекрасным ориентиром дальнейшего развития геофизических методов при решении различных геологических задач.

По докладам I Всесоюзной геофизической конференции было принято 11 резолюций, охватывающих весь спектр геофизических методов и решаемых вопросов [3]. Резолюции, безусловно, очень содержательные и полезные для профессионалов-геофизиков, но, по-видимому, для сотрудников НКВД были важны другие части резолюций.

Их, наверное, могла заинтересовать «Резолюция о роли и месте научно-исследовательских институтов».

В ее первом пункте было записано: *Конференция целиком и полностью поддерживает политику Союзгеоразведки, направленную на то, чтобы во чтобы то ни стало увязать научно-исследовательскую работу в целом с оперативной геологоразведочной работой под углом зрения нашего социалистического хозяйства и в первую очередь нашей социалистической промышленности, а в третьем пункте рекомендовано: В целях правильного перенесения и широкого использования иностранного опыта в СССР, Конференция считает необходимым практиковать: а) заграничные командировки работников по геофизическим разведкам как производственных, так и научных работников; б) приглашение иностранных специалистов как для работ в поле, так и для консультации; в) регулярную выписку иностранной литературы по геофизическим методам разведки как периодическую, так и основную.*

В «Резолюции по вопросу о кадрах и труде» читаем: *Всесоюзная геофизическая конференция отмечает неподготовленность Союзгеоразведки в вопросах кадров по перспективной наметке второй пятилетки и настаивает на том, чтобы Союзгеоразведка добилась выделения высококвалифицированных кадров на Урал и Сибирь. <...> Признает необходимым издание наиболее интересных переводов с иностранных языков по вопросам геофизики. <...> Констатирует полное отсутствие планирования в вопросах рабочей силы, что зачастую приводило к ажиотажу на рабочем рынке и способствовало рваческим тенденциям со стороны отдельных специалистов, считает это положение в дальнейшем абсолютно нетерпимым [3].*

Уже из этих резолюции видим, что стратегически правильно была поставлена задача подготовки геофизических кадров высшей квалификации, издания учебной и научной литературы, и в то же время как резко подвергались критике Союзгеоразведка и другие смежные подразделения. Такие же развернутые резолюции были приняты по всем геофизическим методам (электрометрии, магнитометрии, гравиметрии, сейсморазведке, радиометрии), изготовлению аппаратуры и широкому спектру других проблем. Критическая позиция участников геофизической конференции, конечно, была замечена органами НКВД, и в последующие годы к ним были приняты самые жесткие меры.

Какова же дальнейшая судьба участников конференции, тех ученых, кто стоял у истоков новой науки — геофизики? Ведь в те годы эта наука только начинала формироваться, и еще не было специальности «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» в вузах Советского Союза. При анализе справочных документов оказалось, что из числа 40 участников Всесоюзной геофизической кон-

ференции, которые выступали с докладами и в прениях, 12 человек были репрессированы в 1934—1939 гг.: Г.А.Баженов, В.Р.Бурсиан, С.К.Гирин, М.Ф.Думпис, А.П.Кириков, Б.Ю.Козловский, П.П.Кузнецов, Ю.Н.Лепешинский, Т.П.Первушина, Н.И.Сафронов, П.И.Соболев, П.Т.Соколов. Из девяти членов редакционной коллегии только И.И.Кобозев и А.М.Ленина не подверглись репрессиям. Основных докладчиков пленарного и секционных заседаний постигла та же участь. Почти все они обвинены в принадлежности к контрреволюционной фашистской организации, имевшей террористические цели или подготавливавшей покушение на И.В.Сталина (геофизическая ветвь «пулковского дела»^{*}). В 1956—1957 гг. все они реабилитированы Военной коллегией Верховного суда (ВК ВС) СССР, но многие из них уже, к глубокому сожалению, посмертно.

О многих участниках конференции нет никакой информации, в том числе в справочнике «Геофизики России» [4], как будто не они начинали развивать геофизические методы в начале XX в. и не они успешно применяли их для поисков полезных ископаемых в самых разных регионах Советского Союза. Лишь о некоторых участниках удалось найти краткие сведения в отдельных геофизических статьях и на сайтах Интернета, в раз-

^{*} Пулковское дело — уголовное дело, возбужденное НКВД в 1936—1937 гг. против группы советских ученых по обвинению в «участии в фашистской троцкистско-зиновьевской террористической организации, возникшей в 1932 г. по инициативе германских разведывательных органов и ставившей своей целью свержение Советской власти и установление на территории СССР фашистской диктатуры». Арестованы были сотрудники не только Пулковской обсерватории, но и многих других научных организаций — астрономы, геологи, геофизики, геодезисты, математики. По версии НКВД, создание «контрреволюционного центра» произошло в марте 1932 г., когда в Свердловске проходила Всесоюзная геофизическая конференция. Возглавлял «центр», согласно обвинению, директор Астрономического института Б.В.Нумеров, который имел свою «контрреволюционную группу» еще с 1929 г. По версии следствия, разветвленная организация с центром в Ленинграде имела филиалы в Москве, Киеве, Харькове, Днепропетровске, Новосибирске и других городах. В 1933 г. «центр» якобы установил связь с троцкистско-зиновьевской организацией Ленинграда. По директиве последней, согласно версии следствия, началась подготовка террористических актов против руководителей ВКП(б) и советского правительства. На проходивших в 1933—1936 гг. заседаниях члены организации якобы пришли к решению о необходимости террора против Сталина, а на последнем совещании в феврале 1936 г. будто бы было принято решение об организационной подготовке такого теракта. Участникам «заговора» вменялось в вину также вредительство (саботаж наблюдений солнечных затмений, сокрытие месторождений полезных ископаемых и т.д.). Точная оценка числа пострадавших по делу не представляется возможной. Название — «Пулковское дело» — возникло позже и в материалах дел не употреблялось. — *Примеч. ред.*

делах о репрессированных геологах и геофизиках. Приведем краткие сведения о них.

Георгий Александрович Баженов (1899—1961) — геофизик, специалист по магнитометрической съемке, сотрудник Центрального научно-исследовательского геологического института (ЦНИГРИ, Ленинград), на Всесоюзной геофизической конференции в 1932 г. представлял Уральский геологоразведочный трест (Свердловск), репрессирован.

Виктор Робертович Бурсиан (1886—1945) — геофизик, физик-теоретик, специалист по электро- и термодинамике, физике кристаллов, теории электроразведки, доктор физико-математических наук. Уроженец Петербурга, сын врача. Окончил физико-математический факультет Санкт-Петербургского университета. До 1919 г. преподавал физику в Петроградском политехническом институте, с 1919 г. — в Петроградском (с января 1924 г. — Ленинградском) университете (ЛГУ), профессор (с 1932 г.), заведующий кафедрой теоретической физики, декан физического факультета (1933), директор Научно-исследовательского физического института при ЛГУ (1934). Сотрудник различных геофизических подразделений Геолкома — ЦНИГРИ, организатор и руководитель электроразведочных работ. В 1928—1933 гг. — участник ряда



Титульный лист «Трудов I Всесоюзной геофизической конференции» (Свердловск, 22—27 марта 1932 г.).

экспедиций (Урал, Западно-Сибирская низменность, Кузбасс, Кузнецкий Алатау, Прикаспийская низменность, Баку). Арестован 15 октября 1936 г. По показаниям арестованных, в письменном столе в его служебном кабинете долгое время лежал револьвер, исчезнувший в 1935 г. Это утверждение Бурсиан решительно отвергал. Умер в заключении. Реабилитирован определением ВК ВС СССР 8 декабря 1956 г.

Сергей Кузьмич Гири́н (1896—1937) — геофизик, гравиметрист, кандидат технических наук. Уроженец дер. Фоминское Калязинского уезда Тверской губернии. Окончил Ленинградский горный институт (1925), работал там же (преподавателем, заведующим кабинетом гравиметрии, помощником декана) и в геофизическом секторе ЦНИГРИ, в научно-исследовательских полевых партиях, выпустил пособия для студентов и справочную книгу геофизика-разведчика. Член редакционной коллегии «Трудов I Всесоюзной геофизической конференции». Научный руководитель завода «Геологоразведка». Арестован 13 сентября 1936 г. Выездной сессией ВК ВС СССР в Ленинграде 23 мая 1937 г. приговорен по ст.58, пп.6, 8, 11 к высшей мере наказания. Расстрелян в день вынесения приговора. Реабилитирован 3 декабря 1957 г.

Макс Францевич Думпис (1893—1938) — дипломат, геофизик. Родился в Курляндской губернии. Служил унтер-офицером в 4-м латышском полку. Член РСДРП(б) с февраля 1917 г. В апреле 1918 г. назначен московским губернским военным комиссаром. С 1919 г. работал в Латвии: член РВС Латармии и Рижского ревкома, военком оперативного управления штаба Западного фронта; в 1920 и 1921 гг. командовал 10-й и 170-й бригадами на Польском фронте. Во второй половине 1921 г. отозван из армии и направлен в Наркомат иностранных дел. Генконсул РСФСР в Тебризе (Персия; сентябрь 1921-го — январь 1923 г.), генконсул СССР в Мазари-Шерифе (Афганистан; февраль 1923-го — июнь 1925 г.) и Кашгаре (Китай; июль 1925-го — март 1928 г.). В Мазари-Шерифе завербован ОГПУ, принял на себя функции резидента советской разведки. В 1928 г. работал в секции водного хозяйства Госплана СССР. В 1930 г. окончил Горную академию в Москве, в 1931 г. — экстерном геофизический факультет МГРИ, работал преподавателем, заместителем декана геофизического факультета. В 1932 г. руководил комплексной экспедицией физических методов разведки в Якутии. В 1933—1935 гг. работал в Главном геологоразведочном управлении Наркомата тяжелой промышленности; с декабря 1936-го по март 1937 г. исполнял обязанности директора Московского горного института. С июля 1937 г. исполнял обязанности научного сотрудника АН СССР по Группе технической физики. Награжден орденом Красного Знамени. В канун

ареста — старший научный сотрудник АН СССР. Арестован в ночь с 23 на 24 декабря 1937 г., 19 февраля 1938 г. ВК ВС СССР приговорен к высшей мере наказания. Приговор приведен в исполнение в тот же день на полигоне НКВД «Коммунарка». Реабилитирован 5 мая 1956 г. (информация представлена Ю.И.Блохом, Москва).

Андрей Павлович Кириков (1892—1937) — геофизик, геохимик, доктор геолого-минералогических наук, профессор, создатель радиометрического метода поисков. В 1923 г. окончил Петроградский горный институт. В 1920-х годах — научный сотрудник Радиевого института. К моменту ареста — заведующий радиометрической лабораторией ЦНИГРИ, преподаватель Ленинградского горного института. Арестован 7 ноября 1936 г., находился в «Крестах». ВК ВС СССР приговорен 26 мая 1937 г. по ст.58, пп.10 и 11 к тюремному заключению на 10 лет с конфискацией имущества и последующим поражением в правах на пять лет. После вынесения приговора переведен в г.Грязовец Вологодской обл. Переписка оборвалась в 1937 г. Посмертно реабилитирован 8 декабря 1956 г. В сентябре 1937 г. была арестована его жена, ее осудили как «члена семьи изменника Родины» на пять лет исправительно-трудовых лагерей.

Павел Петрович Кузнецов (1887—1937) — геофизик, магнитометрист, специалист по горной геометрии. Уроженец г.Сердобска Саратовской губернии. В 1916 г. окончил Петроградский горный институт, с 1919 г. — доцент ПГИ, работал на кафедре геофизики. В 1932 г. — инженер Геофизического сектора ЦНИГРИ. Член редакционной коллегии «Трудов I Всесоюзной геофизической конференции». Арестован 8 октября 1936 г. Выездной сессией ВК ВС СССР в Ленинграде 22 мая 1937 г. приговорен по ст. 58, пп. 8 и 11 к высшей мере наказания. Расстрелян 23 мая 1937 г. Реабилитирован 3 декабря 1957 г.

Юрий (Георгий) Николаевич Лепешинский (1891—1937) — геофизик, специалист по электрометрическим и магнитометрическим методам поисков. Уроженец с.Литвиновичи Могилевской губернии. Инженер, научный сотрудник Геофизического сектора ЦНИГРИ, профессор Ленинградского горного института. Член редакционной коллегии «Трудов I Всесоюзной геофизической конференции». Преподавал также в Ленинградском государственном университете. Арестован 20 сентября 1936 г. в Зырянске (Рудный Алтай). Выездной сессией ВК ВС СССР в Ленинграде приговорен 22 мая 1937 г. по ст.58, пп.8 и 11 к высшей мере наказания. Расстрелян 23 мая 1937 г. Реабилитирован 13 декабря 1957 г.

Татьяна Полиевктовна Первушина (1896—?) — геофизик, электроразведчик. Заведовала геофизическим сектором ЦНИГРИ. Член редакционной коллегии «Трудов I Всесоюзной геофизической конференции». Участник XVII Меж-

дународного геологического конгресса (Москва, 1937 г.). Арестована в 1939 г. Дальнейшая ее судьба неизвестна.

Николай Ильич Сафронов (1904—1982) — геофизик, геохимик, создатель геохимических методов поисков рудных месторождений, доктор геолого-минералогических наук, профессор. В 1936 г. окончил Ленинградский горный институт. В 1930-х годах — сотрудник ЦНИГРИ, специализировался в области электрометрических методов. В 1936—1937 гг. — начальник первой Чаунской геологопоисковой экспедиции Всесоюзного арктического института. Арестован в Ленинграде 6 ноября 1937 г. На допросах у него была повреждена барабанная перепонка и разорвана диафрагма. Осужден 3 декабря 1937 г. Особым совещанием при наркоме внутренних дел СССР по ст. 58, пп. 10 и 11 на пять лет исправительно-трудовых лагерей. Отбывал срок сначала на лесоповале в Карелии (близ Медвежьей горы), после начала войны с Финляндией переведен в Актюблаг (Казахстан), где курировал поиски воды для оборонных объектов геофизическими методами. При освобождении (10 ноября 1942 г.) ему был запрещен выезд с территории Актюблага, и он выполнял маркшейдерскую работу на руднике Хромтау. Переведен в Магадан, с 15 апреля 1944 г. — начальник геофизического отдела геологоразведочного управления Дальстроя, проработал на Колыме 11 лет. В 1950-х годах был реабилитирован, вернулся в Ленинград, с 1955 по 1970 г. работал заместителем директора Всесоюзного научно-исследовательского института техники разведки по научной работе. Был одним из основоположников разработки и практического применения комплексных методик для поисков и разведки полиметаллических месторождений на Рудном Алтае, оловорудных объектов в Южной Карелии, золоторудных и оловорудных месторождений на северо-востоке страны, медно-никелевых руд и редкометальных месторождений Кольского полуострова, полиметаллических и золоторудных объектов Узбекистана, оловорудных месторождений в Хабаровском крае.

Петр Илларионович Соболев (1906—1936). Уроженец с. Проскурино Бузулукского р-на Оренбургской губернии. Работал старшим инженером Западно-Сибирского геологоразведочного треста (Томск). Арестован в 1936 г. Расстрелян.

Павел Тимофеевич Соколов (1900—1937) — физик, геофизик, профессор, специалист по теории упругости, сейсморазведке, атмосферному электричеству. Участвовал в разработке методики разведки радиоактивных руд. В 1927—1929 гг. руководил экспедициями Геолкома по изучению радиоактивных руд Средней Азии. В 1929—1932 гг. — преподаватель кафедры электродинамики Ленинградского горного института, вел курс прикладной геофизики в Политехническом институте. В 1932 г. инженер геофи-

зического сектора ЦНИГРИ. Арестован в 1936 г. Возможно, что сотрудники НКВД, изучая в том числе и «Труды I Всесоюзной конференции», могли трактовать не в пользу советской власти отдельные части его доклада «Исторический обзор развития геофизических методов георазведки за границей и в СССР и дальнейшие перспективы и задачи», где он говорил:

Но, разумеется, кроме отрицательных сторон заграничной геофизики, она имеет и положительные стороны. Здесь нужно отметить то, что на базе высокого технического уровня западноевропейских стран геофизическая аппаратура весьма тщательно сконструирована и технически хорошо выполнена. Это для нас имеет колоссальное значение, ибо плохо сделанная схема аппаратуры в условиях полевой работы разваливается, нередко приходит в негодность, и вот тут заграничная аппаратура, конечно, учитывает все условия: влажность, сырость, жару, сухость и т.д. Также надо отметить и быстроту геофизической работы. <...> Разумеется, заграничные геофизические фирмы, которые все время должны всяческими методами снижать стоимость своей работы, придумали очень много остроумного и рационального в этом направлении. Я лично подробно знакомился с теми рационализаторскими мероприятиями, которые проводились в части сейсмического метода. Здесь много ценного, много интересного. То же относится и к результатам обработки, которые даются в достаточной мере быстро. Кроме того, к числу положительных моментов заграничной геофизической работы нужно отнести то, что постановка отдельных работ во многих случаях является весьма четкой.

Безусловно, эту часть доклада можно интерпретировать по-разному, особенно если исходить из позиций НКВД. Соколов погиб в заключении. Реабилитирован 3 декабря 1957 г.

* * *

В заключение следует рассказать о выдающемся геофизике, астрономе **Борисе Васильевиче Нумерове** (1891—1941), которому в НКВД отвели роль организатора и руководителя контрреволюционной группы астрономов и геофизиков (ответвление «Пулковского дела»). Со слов генерал-лейтенанта юстиции в отставке Б.А.Викторова [5, с. 88—89]:

Ему сформулировали ни много ни мало такое обвинение: по заданию агента германской разведки создал в 1930 г. фашистскую террористическую организацию. В 1933 г. установил связь с представителями троцкистско-зиновьевской оппозиции и завербовал целый ряд лиц. Занимался вредительством, направленным на срыв разведки полезных ископаемых и освоения отечественной аппаратуры. Передавал Рейнику, Колюшутеру и Бляшкеву, фашистским аген-

там, сведения оборонного значения. По данным нашего (российского) особого архива установлено, что упомянутые лица не значились в списках германских разведывательных служб. Разумеется, и приборы, с которыми Нумеров знакомил зарубежных гостей, к числу секретных не относились.

Нумеров — доктор астрономии, член-корреспондент АН СССР, директор Астрономического института с 1923 по 1936 г., с 1926 по 1928 г. — директор Главной геофизической обсерватории, в 1931—1933 гг. — заведующий отделом прикладной математики Государственного оптического института. С 1930 по 1934 г. — председатель Астрономического комитета при Наркомпросе РСФСР, автор 100 научных трудов, в том числе первого пособия-руководства «Геофизические методы разведки на нефть» [6—13]. В 1923 г. он выступил с принципиально новой научной работой «Метод численного интегрирования дифференциальных уравнений возмущенного движения и его применение к определению орбит и вычислению эфемерид», создав оригинальный метод экстраполяции, получивший широкое применение на практике. С помощью данного метода был определен восьмой спутник Юпитера, который астрономы не могли отыскать в течение ряда лет. Метод экстраполяции Нумерова не только вошел в отечественные и зарубежные учебники, но и широко применялся в прикладной математике и баллистике.

Много сил и энергии Борис Васильевич посвятил развитию гравиметрии, в частности геологической разведке нефтяных месторождений в СССР, созданию трестов «Эмбанефть» и «Грознефть». Внес существенный вклад в теорию интерпретации гравиметрических данных: применил теорию Стокса для ряда случаев, встречающихся в практике гравиразведки, предложил простые методы определения плотности, размеров, формы и глубины залегающих залежей полезных ископаемых, исходя из общей теории гравитационного поля тел правильной формы. Разработанные им способы обработки и геологической интерпретации гравиметрических данных широко используются геофизиками-разведчиками до настоящего времени. Внес принципиальные технические усовершенствования в маятниковые приборы и гравитационные вариометры. Под его руководством успешно работали гравиметрические экспедиции на р.Эмба, на оз.Баскунчак, на Северном Кавказе в районе Грозного, в Нижнем Поволжье, в Кривом Роге, в Донбассе и на Урале. Нумеров выполнил обширные исследования по теории уклонения отвеса для плоской поверхности, которые связаны с аномалиями силы тяжести. Выступил инициатором совместного развития гравиметрической и геодезической съемки земной поверхности.

При Астрономическом институте Нумеров организовал конструкторскую группу и механичес-

кую мастерскую, в которой был построен ряд гравиметрических и астрономических приборов и в 1933—1934 гг. организовано серийное производство маятниковых приборов. По его руководством была сконструирована новая модель гравитационного вариометра с тремя рычагами (она с успехом применялась в Эмбинском р-не, давая производительность в два раза большую, чем обычная система Бамберга). В 1932 г. по инициативе и при личном участии Бориса Васильевича было начато строительство первой в СССР астрофизической обсерватории в Абастумани на горе Канобили (Грузия).

В ночь с 21 на 22 октября 1936 г. Нумеров был необоснованно арестован и приговорен 25 мая 1937 г. по ст. 58 пп.6 (шпионаж), 7 (вредительство), 8 (террор), 11 (организация заговора против советской власти) к 10 годам тюремного заключения с конфискацией имущества и высылке семьи (жены и троих детей в возрасте 10, 13 и 15 лет). Находясь в тюрьме «Кресты», он написал на клочках бумаги три новые работы: «Автоматическая машина», «Теория больших планет», «Определение склонений», которые были направлены 25 июня 1937 г. в Верховный Совет СССР вместе с просьбой о помиловании (но судьба этих записок неизвестна).

В июле 1937 г. имел в тюрьме несколько свиданий с семьей, но в сентябре 1937 г. его жена Е.Е.Нумерова была осуждена на пять лет пребывания в исправительно-трудовом лагере без права переписки. На последнем свидании Борис Васильевич сумел передать письмо, написанное карандашом на папиросной бумаге, в Президиум АН СССР (СПб филиал архива РАН, ф. 950, оп.1, №7). Приводим его частично на основании публикации [8].

В Президиум Академии наук СССР Осенью и зимой 1936 года в Ленинграде была арестована группа ученых: математиков, астрономов, физиков, геофизиков. И между прочими был арестован Б.В.Нумеров — директор Астрономического института в Ленинграде и член-корреспондент Академии наук. Б.В.Нумеров был обвинен, как организатор контрреволюционной группы астрономов и геофизиков, в связи с германскими фашистами (1929), во вредительстве, в шпионаже, в терроре, одним словом, во всех возможных преступлениях против советской власти и Родины.

Несмотря на отсутствие конкретных фактов и заявления о полной невиновности по пунктам обвинения, Б.В.Нумеров принужден был взять на себя фиктивно часть преступлений (организация, фашизм). Суд 25-го мая 1937 года в течение нескольких минут, без вызова свидетелей, других обвиняемых, без защиты, без сопоставления фактов осудил Б.В.Нумерова к 10 годам тюремного заключения, конфискации иму-

щества, высылке семьи (жена и трое детей). Ни одного факта вредительства не было предъявлено. Демонстрирование в 1934 году директору Потсдамского геодезического института уже опубликованных работ было принято как шпионаж.

По материалам следствия Б.В.Нумеров был в июне 1936 года в Ленинграде, когда он был в это время на затмении. Дело не было предъявлено Нумерову на ознакомление перед судом. Такое несправедливое отношение ко мне и другим научным работникам астрономии естественно вызывает глубокую обиду, и встает вопрос: неужели члены правительства не могут вмешаться и восстановить истину? Кому нужны такие надуманные процессы? Тем более становится обидным, если вспомнить свою работу (почти в течение 25 лет), честную, интенсивную работу, благодаря которой целый ряд новых областей астрономии, геодезии были подняты на высокую ступень в Союзе.

Я обращаюсь к АН СССР с просьбой обратить внимание членов правительства на изложенные мною факты и оказать мне возможность в осуществлении намеченных новых работ. После суда я не имею возможности вести научную работу, нет книг, нет бумаги, нет карандаша. Сижу седьмым в малой камере в Крестах и не имею никаких перспектив на работу. Моя творческая энергия гибнет, работать не дают. Осужденному несправедливо, лишенному состояния, прав,

семьи, работы, мне остается последний путь — призыв к Академии наук.

Б.В. Нумеров
13-го июля 1937 года.
Ленинград. Кресты

Позднее Нумеров был отправлен во Владимирскую тюрьму (1937—1940) и затем в Орловский каторжный централ. Расстрелян 15 сентября 1941 г. в г.Орле (по приговору от 13 сентября 1941 г. без какого-либо дополнительного расследования или допроса) перед сдачей города фашистам. Место захоронения не установлено. Исключен из Академии наук СССР Общим собранием 29 апреля 1938 г. Реабилитирован по обоим приговорам Постановлением ВК ВС СССР от 11 мая 1957 г. и восстановлен в Академии наук решением Президиума АН СССР от 11 августа 1967 г.

* * *

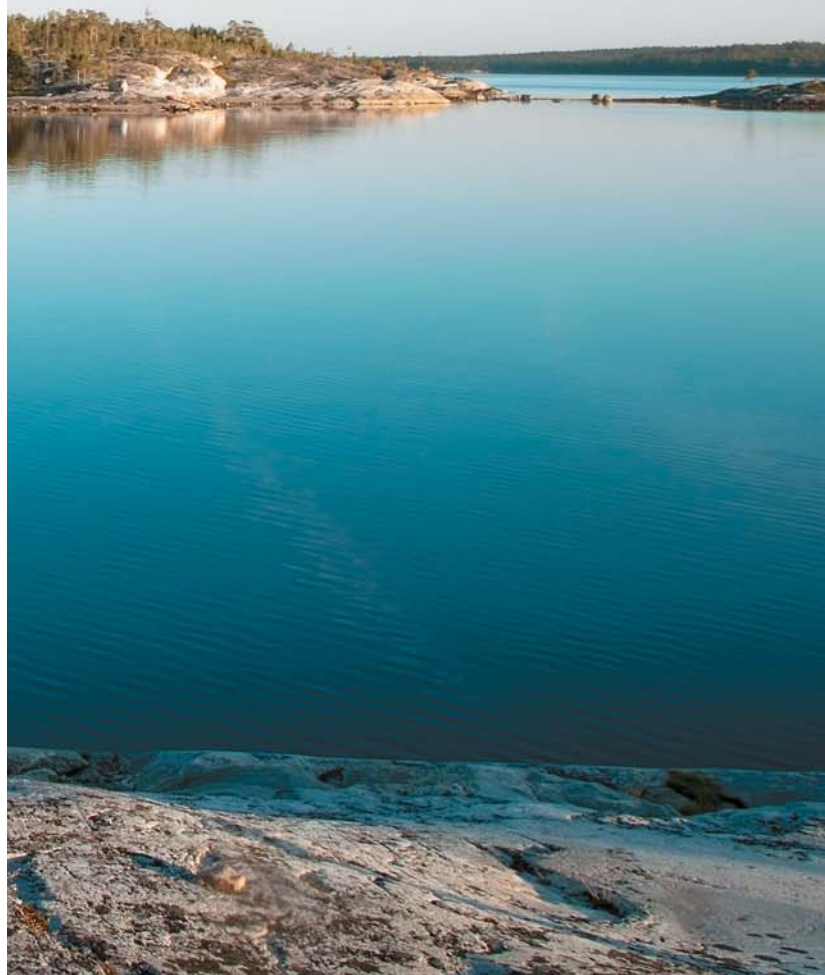
Таким образом, анализ материалов I Всесоюзной геофизической конференции и сведений о репрессиях геофизиков дает исторический срез развития геофизической науки 1930-х годов и возможность увидеть сложную судьбу первых советских геофизиков, положивших начало открытию многих нефтегазовых и соляных месторождений России. Не следует забывать истоки развития геофизики и базовые достижения в этой области, которые позволяют в настоящее время успешно решать экономические задачи страны. ■

Литература

1. Костицын В.И. Гравиметрист Б.Ю. Козловский — представитель рода А.С.Пушкина // Кафедра геофизики Пермского государственного университета. Пермь, 2004. С.165—177.
2. Хомизури Г.П. Террор против геологов в СССР. М., 2010.
3. Труды I Всесоюзной геофизической конференции (Свердловск, 22—27 марта 1932 г.). Л.; М.; Новосибирск, 1933.
4. Геофизики России: Информационно-биографический справочник / Гл. ред. Н.А.Савостьянов. М., 2005.
5. Успенская Н.В. Вредительство... в деле изучения солнечного затмения // Природа. 1989. №8. С.86—98.
6. Абалакин В.К. Люди науки. Б.В.Нумеров и его время (к 100-летию со дня рождения) // Земля и Вселенная. 1991. №1. С.39—45.
7. Еремеева А.И. 100 лет со дня рождения советского астронома и организатора науки Б.В.Нумерова (1891—1941) // Астрономический календарь. М., 1990. С.335—342.
8. Мельникова Ж.М. Какая польза для страны в этом — мне неизвестно! // На рубежах познания Вселенной: Историко-астрономические исследования. Вып.22. М., 1990. С.473—481.
9. Нумерова А.Б. Борис Васильевич Нумеров (1891—1941). Л., 1983.
10. Нумерова А.Б., Невская Н.И. Борис Васильевич Нумеров (1891—1941). Последние годы жизни. Документы и воспоминания // Деятели русской науки XIX—XX веков. СПб., 1993. С.131—157.
11. Харадзе Е.К. Б.В.Нумеров и развитие астрономии в Грузии // Земля и Вселенная. 1981. №3. С. 53—54.
12. Яхонтова Н.С. Б.В.Нумеров (к 70-летию со дня рождения) // Бюл. И-та теор. астрономии АН СССР. 1963. Т.9. №3 (106). С.213—215.
13. Костицын В.И. К 120-летию со дня рождения Бориса Васильевича Нумерова // Геофизический вестник. 2012. №12. С.14—18.

Редкая встреча моржа в Белом море

А.А.Сухотин,
кандидат биологических наук
В.Я.Бергер, А.Д. Наумов,
доктора биологических наук
Беломорская биологическая станция «Картеш»
(Лоухский район, Карелия)
Зоологического института РАН (Санкт-Петербург)



Еще около тысячи лет назад моржи (*Odobenus rosmarus*) были характерными для Белого моря морскими млекопитающими. Вероятно, охота на них стала одной из существенных причин организации промысловых экспедиций новгородцев на Белое море, что в конце концов привело к колонизации Поморья славянскими племенами. Не слишком многочисленная беломорская популяция моржей была довольно быстро уничтожена интенсивным промыслом [1, 2].

Вплоть до 70-х годов прошлого столетия заходы моржей в Белое море (его северную часть) были чрезвычайно редки. Ситуация стала постепенно меняться лишь в самом конце XX — начале XXI в., когда разными исследователями в Белом море были зарегистрированы не только одиночные животные, но и группы моржей, состоящие из двух—пяти особей. Обычно их наблюдали только в Горле, Воронке и Мезонском заливе и изредка в Бассейне. Постепенно моржи стали появляться и во внутренних участках беломорской акватории. Документированные встречи с единичными животными происходили в кутах Кандалакшского и Двинского заливов в 2002—2003 гг. [3]. Надо думать, что эти отдельные экземпляры принадлежали к сохранившейся до сих пор новоземельской популяции.

24—25 мая 2013 г. молодой морж был обнаружен в устьевой части губы Чупа (Кандалакшский залив), вблизи нашей биостанции. Это было сравнительно небольшое (около 2 м в длину) животное, покрытое светлой шерстью охристого цвета. Судя по размерам клыков (менее 10 см), возраст моржа не превышал двух лет.

За сутки наблюдений поведение зверя изменилось. Если утром первого дня он активно плавал и нырял в бухте вблизи

© Сухотин А.А., Бергер В.Я.,
Наумов А.Д., 2014



Раненый морж на скале во время отлива. Мыс Картеш. На снимках отчетливо видны многочисленные кровоточащие раны на спине и на боку зверя.

Фото А.А.Сухотина и А.Д.Наумова

биостанции, вылезал на берег, фыркал и кидался на облаивавших его собак, то уже к вечеру он уплыл в недоступное для них место, где, выбравшись на прибрежные камни, пролежал всю ночь. На другой день утром морж был обнаружен на обсыхающих после отлива скалах вблизи биостанции. Животное было вялым, с трудом поднимало голову и практически не реагировало на людей, приблизившихся к нему на моторных лодках. Выяснилось, что морж был ранен выстрелами картечью или крупной дробью.

Вечером 25 мая на том месте, где его видели утром, моржа не было. Поиски на окрестных побережьях, а также водолазные исследования дна

вокруг этого места результатов не принесли. Возможно, он уплыл, либо был отнесен течением и утонул за пределами района поисков.

В средствах массовой информации появились утверждения, что этот морж был убит в Чупинской губе*. Кто стрелял в животное, занесенное в Красную книгу, когда и где это произошло, мы не знаем, но то, что морж был ранен и по этой причине мог погибнуть, сомнений не вызывает.

Напомним, что в нашей стране промысел моржей был повсеместно запрещен в еще 1956 г. Норвегия также ввела запрет на добычу этих ластоно-

* www.kareliacoast.org/index.php/novosti/110-morge

гих. Ряд ограничений был установлен и в Канадском секторе Арктики. В 1978 г. моржа занесли в Красную книгу СССР [4]. Впрочем, к этому времени от моржей Белого моря остались только воспоминания в виде отдельных географических названий: о. Моржевец, Моржевецкая Салма (фин. *salmi* — пролив) и т.п. Сохранялись лишь сильно поредевшие стада в Баренцевом и Карском морях. Современная численность моржей в Баренцевом море, по разным оценкам, составляет всего от 2.2 до 4.0 тыс. особей [5, 6].

Известно, что охота на охраняемых животных считается браконьерством, т.е. уголовным преступлением. К сожалению, незаконная охота на птиц и морского зверя, сборы птичьих яиц происходят часто и повсеместно. Отстрел моржа, который случайно оказался во внутренних районах Белого моря, — просто варварство, которое, скорее всего, останется безнаказанным. Выследить и поймать браконьеров в малонаселенных местах Беломорского побережья практически невозможно, сколько бы инспекторов Госохотинспекции ни патрулировали побережье. Действительно эффективным способом сохранить редкие и исчезающие виды животных и растений может быть только воспитание с детских лет бережного отношения к природе.

Нельзя забывать, что численность животных и растений может претерпевать значительные изменения, вызванные как природными, так и антропогенными воздействиями. Это особенно характерно для тех видов, которые служат объектами промысла. Если добыча превышает способность вида к самовоспроизведению, запасы промышленного объекта падают и в конце концов приходят к такому состоянию, когда добывать оказывается



Места обнаружения моржей в Белом море в 1985—2010 гг. [3]. Красной точкой отмечено место (66°20' с.ш., 33°39' в.д.), где был встречен морж в 2013 г.

практически нечего. В истории человечества мы знаем немало примеров, когда хищнический промысел приводил к вымиранию крупных и относительно малоподвижных животных. Достаточно вспомнить стеллерову корову, моа, европейского зубра, американского бизона и многие другие виды. Варварское отношение к природе легко может привести к тому, что и моржи займут в этом списке свое место. ■

Литература

1. Кузнецов В.В. Белое море и биологические особенности его флоры и фауны. М.; Л., 1960.
2. Наумов А.Д., Федяков В.В. Вечно живое Белое море. СПб., 1993.
3. Светочев В.Н., Светочева О.Н. Морские млекопитающие: биология, питание, запасы // Биологические ресурсы Белого моря: изучение и использование. СПб., 2012. С.261—285.
4. Тимошенко Ю.К. Редкие и находящиеся под угрозой вымирания виды ластоногих // Белое море. Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования. СПб., 1995. Т.2. С.150—152.
5. Семенова В.С., Болтунов А.Н., Никифоров В.В., Светочев В.Н. Исследования атлантического моржа (*Odobenus rosmarus rosmarus*) в юго-восточной части Баренцева моря в 2011—2012 гг. // Морские млекопитающие. Суздаль, 2012. Т.2. С.228—234.
6. Черноок В.И., Лидерсен К., Глазов Д.М. и др. Авиачет атлантического моржа (*Odobenus rosmarus rosmarus*) в Печорском море в августе 2011 г. // Морские млекопитающие. Суздаль, 2012. Т.2. С.366—369.



Пещера Прометея в Западной Грузии

Е.Н.Матвиенко,

*кандидат геолого-минералогических наук
Минералогический музей им.А.Е.Ферсмана РАН*

М.Ю.Поваренных,

*кандидат геолого-минералогических наук
Институт истории естествознания и техники РАН
Москва*

В сентябре 2012 г. нам посчастливилось предпринять двухнедельное путешествие по Грузии с посещением закарстованных территорий. Оказалось, что въезд в страну совершенно свободен, народ все так же необыкновенно гостеприимен, цены весьма умеренны, а великолепные культурные и природные памятники вполне доступны. Среди последних яркое впечатление оставила пещера Прометея, она же Кумистави.

Вследствие широкого развития на Кавказе известняковых толщ верхнеюрского и мелового возраста, особенно мощных на южном склоне Большого Кавказского хребта, карст в Грузии проявлен великолепно. В отдельных районах общая мощность карстующихся пород достигает 2600 м [1]. Такая огромная масса карбонатных отложений при наличии различных благоприятствующих факторов (обильных осадков, относительно высоких среднесуточных температур, активных тектонических движений и др.) обуславливает масштабность и многообразие карстовых явлений. Еще в советские годы на грузинской территории было зафиксировано свыше 600 пещер — более двух третей всех известных в Советском Союзе [2]. Сосредоточены они по большей части в Западной Грузии. Горная известняковая полоса, занимающая промежуточное положение между складчатой системой южного склона и Грузинской глыбой, рассматривается как спелеологическая провинция [1]. Хорошо известны пещеры Абхазии, например Новоафонская, открытая в 1961 г. и обустроенная для посещений в 1975-м. В схеме спелеологического районирования она отнесена к подпровинции предгорных и низкогорных массивов — как и пещеры Нижне-Имеретского р-на, в частности Цхалтубской волнистой равнины, образованные

Заметки и наблюдения

© Матвиенко Е.Н., Поваренных М.Ю., 2014

преимущественно нижнемеловыми известняками [2]. На теперешней территории Грузии наиболее интересны для туристов пещеры Цхалтубского карстового региона, имеющие сложное гидрогеологическое строение. Регион находится на восточной холмистой окраине Колхидской низменности, в долине р.Цхалтубо. С северо-востока к ней примыкают отроги Сальгуральского хребта Большого Кавказа. Бальнеологический курорт Цхалтубо известен термальными водами и радоновыми источниками. Он расположен в 9 км к северо-западу от древнего Кутаиси, второго по величине города Грузии, центра Имеретии.

Заповедник «Сатаплия»

В 2 км от Цхалтубо находится комплекс горы Сатаплия — охраняемая территория, национальный заповедник. Его история началась в 1925 г., когда сотрудник Кутаисского краеведческого музея П.Чабукиани, следовавший за течением ручья, открыл уникальную пещеру. Несколько позже на известняковой площадке мелового возраста близ пещеры были обнаружены следы динозавров. Сатаплийское «плато динозавров» — наряду с Раватским ущельем в Таджикистане и урочищем Ходжапиль в Туркмении — один из трех таких природных памятников бывшего Советского Союза. Причем в Грузии следы сохранились на двух слоях, возраст которых различается на 20 млн лет. Здесь «разгуливали» как хищники, так и животные растительноядных видов. Это факт уникальный. В 1935 г. для защиты геологических, палеонтологических, спелеологических и ботанических ценностей создается государственный заповедник «Сатаплия». В нем сохранен реликтовый лес колхидского типа с рекордным количеством субтропической флоры. Изучение территории продолжалось. В 1973 г. сотрудники тбилисского Института географии им.Вахушти Багратиони Грузин-

ской академии наук в 9 км к северо-западу от Цхалтубо, близ деревни Кумистави, обнаружили новую пещеру. Сейчас охраняемая территория попала в правительственную программу, и эту часть Западной Грузии решили превратить в туристический рай. Для художественного оформления призвали дизайнеров из Германии. На территории заповедника построено специальное сооружение для консервации следов динозавров, вымощены тропинки в колхидском лесу, в пещерах установлена современная система освещения и акустики. Пещера Кумистави получила название в честь Прометея, якобы прикованного некогда неподалеку, на горе Хвамли. В 2010 г. для посещения туристов открыли обновленную пещеру Сатаплия, а в 2011 г. — Прометея.

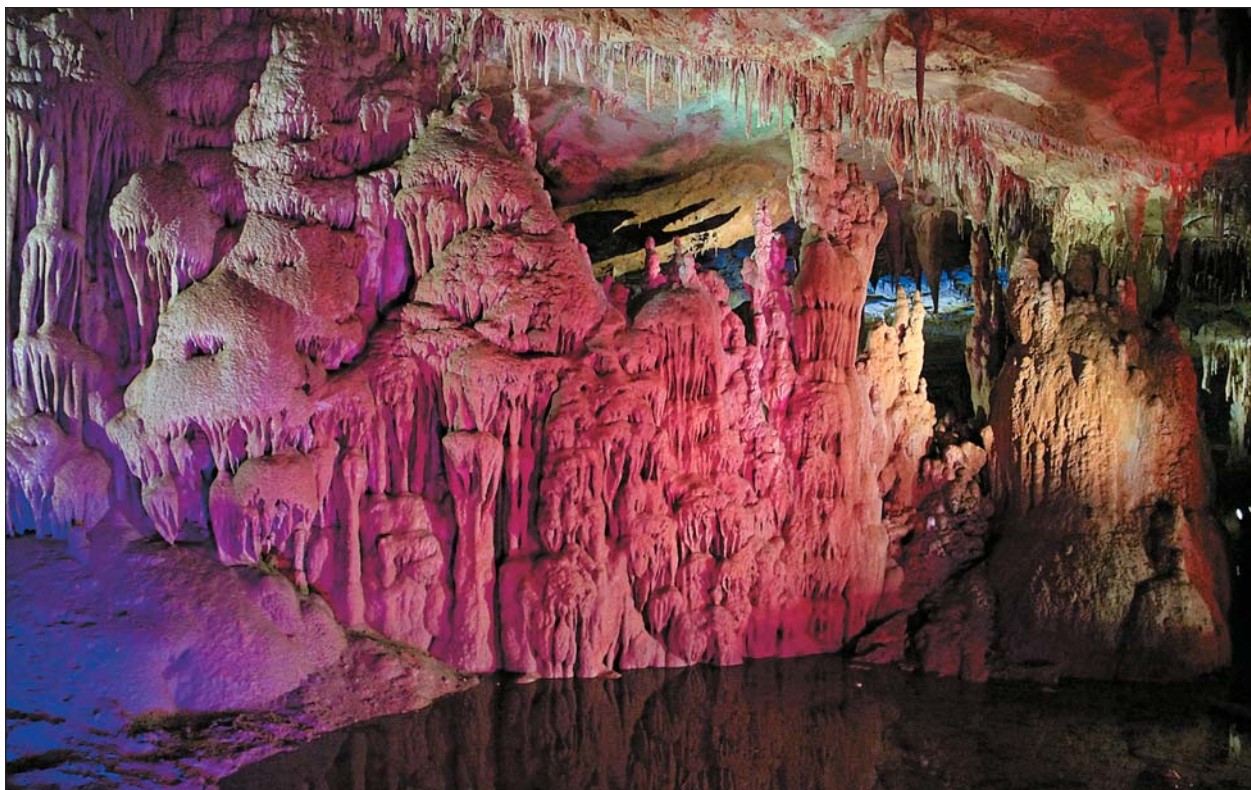
Новая пещера

Вход в эту пещеру находится на высоте 100 м над ур.м. Общая длина ходов составляет около 20 км. Площадь ее оценивается в 200—250 км², а глубина — примерно в 40 м. Сейчас здесь найдено 17 залов, семь входов. Обустроен и специальный туристический маршрут длиной 1.6 км, который заканчивается у подземного озера. Желающие могут сесть в лодки и выплыть на поверхность по подземной реке. В пещере постоянная температура 14°C. Здесь обитают летучие мыши, а также приспособившиеся к существованию в темноте пресноводные моллюски, пауки, черви, слепые ракообразные. Дорожки и лестницы размещены так, что маршрут дает возможность осмотреть пять больших (протяженностью до 35 м и высотой до 7 м) залов. Осветительные приборы создают мягкую, местами цветную подсветку, играет негромкая классическая музыка.

Обращают на себя внимание сложная конфигурация карстовой полости, признаки неоднократного происходивших обрушений и явная стадийность формирования, когда этапы минералообразования сменялись перерывами и периодами растворения. В целом все это, а также гигантские сталактиты и сталагмиты напоминает Новоафонские пещеры, которые изучал известный советский минералог В.И.Степанов. Он определил особенности генетических этапов их развития. Попробуем сравнить увиденное нами с его описанием и охарактеризовать встреченные минеральные агрегаты (по возможности в терминах, предложенных им при создании выставки «Пещеры» в Минералогическом музее РАН).



Карта Западной Грузии. Заповедник «Сатаплия» (красный квадрат к северо-западу от г.Кутаиси).



Сталактито-сталагмитовая кора возле пещерного озера. Высота потолка до 5 м.

Здесь и далее фото А.К.Лобачева



Массивные каменные водопады и драпировки. Высота до 3 м.



Серо-стальные (за счет примеси оксидов и гидроксидов марганца) сталактиты и сталагмиты. Размер осветителя (справа внизу) около 20 см.

Фото Е.А.Кисловой

Глинистая и глинисто-песчаная примесь — причина окраски карбонатной сталактито-сталагмитовой коры. Высота потолка до 2.5 м.

В пещере Прометея, так же, как и в Новоафонской, развита мощная туфовая сталактито-сталагмитовая кора — пористая кальцитовая порода, которая формирует мощные гравитационные пещерные образования [3, 4]. На крутопадающих участках глыбовых завалов встречаются громадные каскады, каменные водопады и драпировки. Коричневато-серая окраска сталактитов и сталагмитов объясняется терригенной примесью (глинистой и глинисто-песчаной). Зачастую она распределена неравномерно, иногда проглядываются белые фрагменты кальцитовой коры. Ее кристаллизация происходила медленнее туфовой, без захвата терригенного материала, который поступал с периодически заполнявшими пещеру потоками.

Мы видели и красно-бурые, реже ярко-желтые и черные образования с металлическим отливом, обусловленные, скорее всего, присутствием примеси соединений железа и марганца.

Сталактиты в пещере Прометея развиты чрезвычайно обильно (в большей степени, чем в Новоафонской). Их формы удивительно разнообразны: конические, цилиндрические, трубчатые, эксцентрические. Иногда мы наблюдали подводные каналы. При удачной подсветке можно было



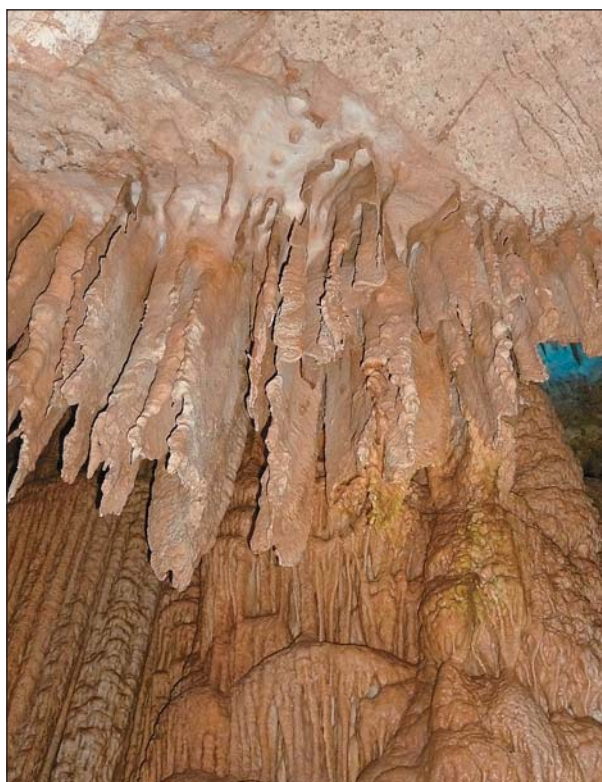
Трубчатый (фибриллярный) характер внутреннего строения сталактитов. Диаметр внутреннего канала изменяется от 0.1 до 2.5 мм. Длина сталактитов достигает 50 см.

Фото Е.Н.Матвиенко

увидеть, как их устья маркируют капельки воды, подчеркивающие тонкотрубчатое (фибриллярное) строение каналов, характерное для стеклянных световодов [5–7].

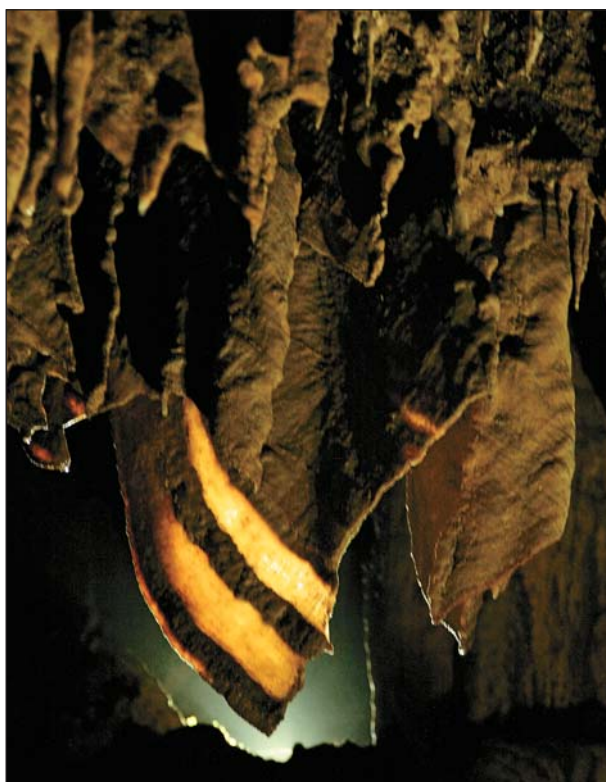
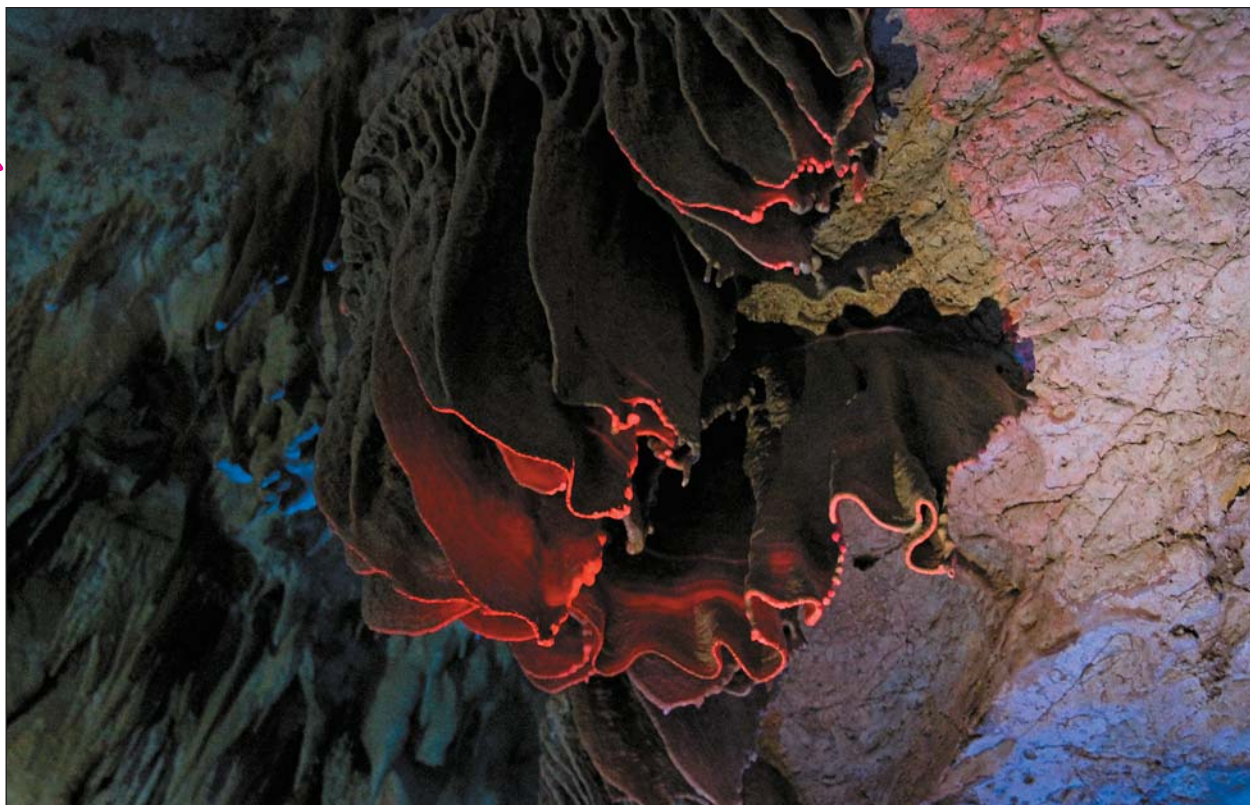
Интересны ансамбли сталактитов, развивающихся вдоль трещин свода, а также уплощенные формы — продукты линейного просачивания [4]. Чутко следуя положению в пространстве питающей поверхности, эти природные минералогические отвесы приобретают сложные формы, порой сливаясь и образуя причудливо изогнутые занавеси.

Здесь также широко распространены и туфовые сталагмитовые коры, возникающие при площадном питании (плоском гравитационном потоке). При осевом питании на первичной стадии роста собственно сталагмита (до того как вступает в силу правило роста минеральных агрегатов — геометрический отбор) образуются характерные корки типа «яичница». Крупные туфо-кальцитовые сталагмиты со сложной поверхностью (туфлагмиты, по Степанову), подобные новофонским, отражают многостадийность образования. Их поверхность, как правило, сглажена (возможно, в результате растворения при периодических затоплениях пещеры). На сталагмитовые покровы



Ансамбли сталактитов, развившиеся вдоль трещин свода, и уплощенные образования — продукты линейного просачивания. Длина сталактитов до 0.5 м.

Фото Е.Н.Матвиенко



Сталактитовая занавесь с просвечивающими «чистыми» полосами, выделяющимися на окрашенном глиной фоне. Ширина полос достигает 4 см.

А.К.Лобачева

Причудливо изогнутые сталактитовые занавеси. Размер до 0,8 м. Красная подсветка.

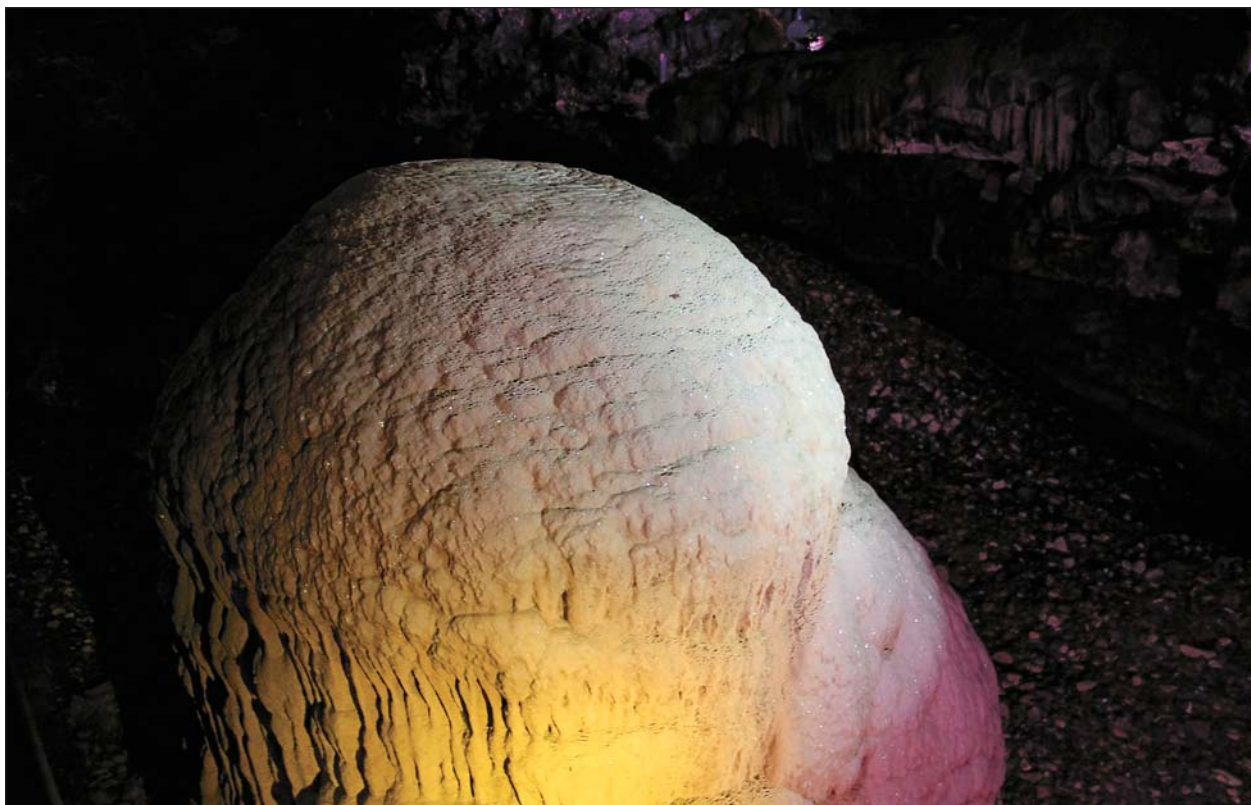
Фото А.К.Лобачева

местами нарастают конические и цилиндрические постройки, окрашенные глинистой примесью, которые часто сростаются с соответствующими сталактитами. Образуются так называемые сталагматы.

Встретили мы и белоснежный цилиндр с шароподобным завершением и блестящими гранями новообразованных кристалликов кальцита или, возможно, гипса. В Анакопийской пещере Нового Афона отмечено обилие агрегатов гипса [3], и не исключено, что в сухой период жизни пещеры они могли образоваться и здесь [7].

Для пещеры Прометея типичны комбинированные формы карстовых образований. Сталактитовые драпировки оторачивают сталагмиты, а неоднократные обрушения пород в этом сейсмически активном районе могут превратить поверхность свода в пол. На сталагмиты и сталактиты первой генерации нарастают с видимыми границами последующие образования, подчеркивая перерывы в кристаллизации и изменения ее условий (например, уровня стоявшей в пещере паводковой воды).

В Новоафонской пещере, в Геликтитовом зале, на сталактиты нарастают причудливо изгибающиеся цилиндрические веточки, возникающие при кристаллизации на выходе из капиллярного канала, — геликтиты. В пещере Прометея опреде-



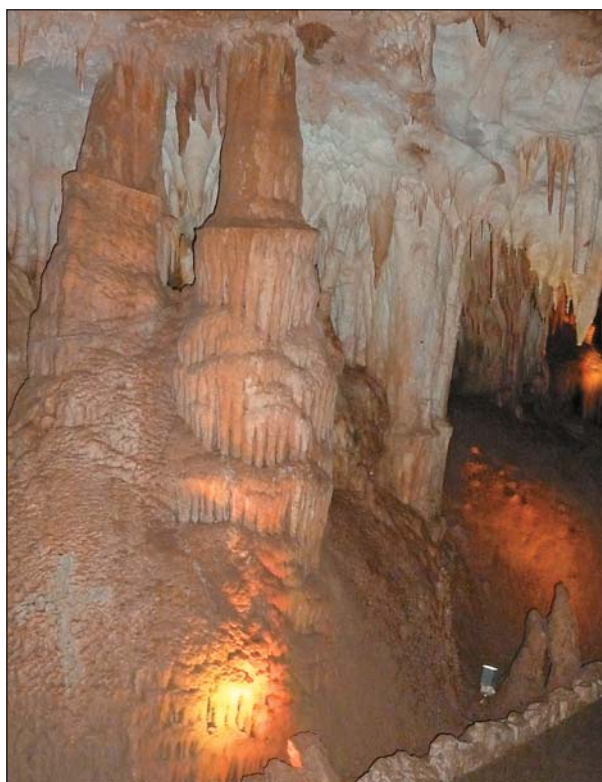
Колонна сталагмита высотой 1,5 м с блестящими кристалликами кальцита (или гипса?) на поверхности.

Фото Е.Н.Матвиенко

лить их надежно нам не удалось. Точная диагностика требует исследования характера подводящего канала, иначе их можно спутать с эксцентрическими сталактитами. Вообще здесь зачастую трудно выделять отдельные формы из-за сложного характера карстовых образований, распространённости парагенетических ансамблей (сталактит—драпировка и др.), гибридных текстур [4].

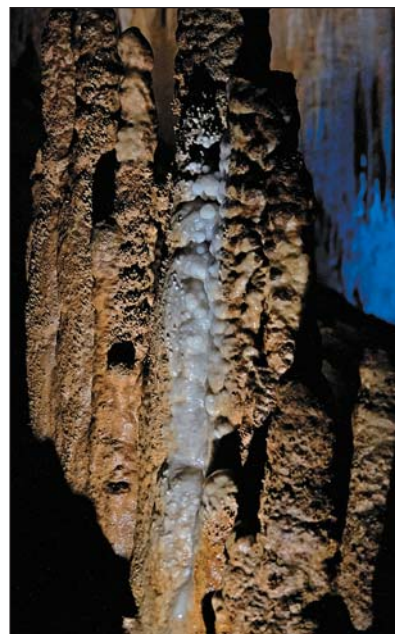
Немного о карстовом минералообразовании

Все минеральные формы в карстовых пещерах представляют собой типичные *минералы-эфмеприды*. Характерное время их «жизни» (онтогенеза) — от зарождения и до разрушения — измеряется десятками, сотнями и весьма редко несколькими тысячами лет. Растут кристаллы быстро: с каждым отрывом капли раствора и ее падением вниз (а капель происходит со скоростью несколько капель в минуту). Для сравнения: время «жизни» обычных минералов магматических горных пород измеряется сотнями тысяч и миллионами лет. Кроме того, недавно получены (по замерам абсолютного возраста изотопным методом на ионном микрозонде от центра зерна к краям) свидетельст-



Сталактито-сталагмитовая кора нескольких генераций. Хорошо видны границы, свидетельствующие об изменении условий карстового минералообразования.

Фото Е.А.Кисловой



Фрагмент. Размер по вертикали 0.5 м.
Фото С.Д.Иванова

Ансамбли сталактитов. Высота 2.5 м.
Фото А.К.Лобачева

ва онтогенеза кристалла циркона ($ZrSiO_4$) продолжительностью около 1 млрд лет [8].

Еще один существенный фактор, ответственный за эфемерность здешних карстовых минералов, — случающиеся примерно один раз в тысячу лет катастрофические (9—10-балльные) и один раз в 150 лет крупные (7—8-балльные) землетрясения. Так, Спитакское событие, произошедшее на нашей памяти в Армении в 1988 г., безжалостно разрушило множество минеральных построек в близлежащих пещерах и кардинально поменяло их гидрогеологический режим [9].

Иные генезис и внутреннее строение имеют подчас внешне похожие друг на друга сталактиты

и сталагмиты. Это связано с различным механизмом их образования. Первые формируются за счет выпадения вещества из раствора при отрыве капли по краю мениска и последующего роста карбонатной (в большинстве случаев) фибриллы. Реже происходит осаждение из сочащегося раствора по уже имеющейся поверхности (так образуются «драпировки и занавеси»). Вторые растут снизу вверх за счет падения капель раствора сверху вниз (практически в одну точку) и осаждения из капающего раствора и его брызг.

Минеральные образования в карстовых пещерах обладают седиментационными гравитационными текстурами — индикаторами вертикали

(минералогические отвесы — сталактиты и частично сталагмиты и сталагматы) и горизонталы (минералогические уровни — забереги). По ним можно надежно определить направление силы тяжести в момент их роста в пещерах [10].

Исследователи установили разноуровневую периодичность кристаллизации минерального вещества в пещерах. Так, для хорошо изученных кальцитовых сталактитов из пещер Зауэрланда (Германия) показано, что средняя толщина ежегодно нарастающего на них кальцитового слоя составляет всего около 0.01 мм (что соответствует скорости роста примерно 1 мм за 70 лет), а возраст сталактита достигает 12 тыс. лет [11, 12]. В.И. Мальцев, изучая гипсовые кристаллы из туркменской пещеры Кап-Кутан, определил их фибриллярное внутреннее строение. Диаметр трубочек он оценил в 0.002—0.1 мм. Их же агрегаты, так называемые волосы и паутина, сложены еще более тонкими фибриллами [13]. Применяя уравнение Пуазейля

(для расчета давления капли жидкости, необходимого для ее ламинарного течения сквозь цилиндрическую трубку), Мальцев оценил скорость ламинарного просачивания примерно в 40 см/год (т.е. скорость роста минеральных волокон составила около 0.4 мм/год) [14]. Эта величина близка к полученной по изучению годовичных минеральных ритмов в кальцитовом сталактите. По-видимому, такие же параметры карстового минералообразования свойственны и карбонатным сталактитам и сталагмитам пещеры Прометея (с поправкой на значительно больший наблюдаемый здесь диаметр фибрилл ~0.1—2.5 мм).

Таким образом, Грузия предоставила нам великолепную возможность проникнуть в уникальную природную лабораторию образования минерального вещества практически на глазах. К тому же природные памятники здесь находятся в неповторимом ансамбле с мировыми шедеврами культуры (такими, например, как монастырь Гелати). ■

Литература

1. Геология СССР. Т.Х. Ч.1. М., 1964.
2. Тинтилозов З.К. Карстовые пещеры Грузии. Тбилиси, 1976.
3. Степанов В.И. Периодичность процессов кристаллизации в карстовых пещерах // Труды мин. музея им.А.Е.Ферсмана. 1971. Вып.20. С.161—171.
4. Степанов В.И. Структуры и текстуры минеральных агрегатов, образующихся в свободном пространстве пустот // Спелеология в России. 1998. Вып.1. С.70—91.
5. Мрошкин В.В. О генезисе агрегатов кристаллититового типа // Новые данные о минералах СССР. 1976. Вып.25. С.82—89.
6. Слетов В.А. К онтогении кристаллититовых и геликтитовых агрегатов кальцита и арагонита из пещер юга Ферганы // Новые данные о минералах. 1985. Вып.32. С.119—127.
7. Maltsev V.A. Minerals of the Cupp Coutunn karst cave system, Southeast Turkmenistan // Мир камня. 1993. №2. С.5—30.
8. Dhuime B.P.M., Hawkesworth C., Cawood P.A., Storey C.D. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago // Science. 2012. V.335. №6074. P.1334—1336.
9. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М., 1987.
10. Дымков Ю.М. Гравитационные текстуры минеральных агрегатов // Онтогения минералов в практике геологических работ. Свердловск, 1984. С.121—134.
11. Жабин А.Г. Космические процессы и минералообразование // Земля и Вселенная. 1982. №1. С.31—40.
12. Жабин А.Г. Космогенные хроноритмы и зональность гипергенных минералов // Докл. АН СССР. 1979. Т.249. №4. С.962—964.
13. Maltsev V.A. Sulphate filamentary crystals and their aggregates in caves // Proc. Univ. Bristol Spelaeol. Soc. 1996. V.20. №3. P.171—185.
14. Малышевский Д.И. Механизмы роста минералов в случае фильтрации через пористые среды: образования, регулируемые эффектом мембраны // Записки ВМО. 1996. Т.151. Вып.2. С.121—130.

Многоликие кремни

В.Н.Комаров,

кандидат геолого-минералогических наук

Российский государственный геологоразведочный университет им.С.Орджоникидзе
Москва

Научные сообщения

Мир кремнезема, имеющий в своей основе лишь одно исходное вещество (диоксид кремния — SiO_2), удивительно разнообразен. Более 20 минералов и их разновидностей, входящих в эту группу, составляют по весу примерно 12% всей литосферы [1]. Это и широко распространенные, знакомые всем образования, и редкие, известные только узким специалистам; важные в прикладном отношении и не нашедшие до настоящего времени практического применения; яркие, броские и скромные, незаметные. Наиболее распространены кварц, его скрытокристаллическая разновидность — халцедон и опал.

Одни из интереснейших природных объектов мира кремнезема — кремни, состоящие обычно из

халцедона, кварца и в меньшей степени опала в различных соотношениях. Большинство специалистов рассматривают кремни как горную породу. По минеральному составу выделяются халцедоновые (самые распространенные), кварцево-халцедоновые и наиболее редкие — опалово-халцедоновые и опаловые разновидности [2]. В состав кремней также входят придающие им различную окраску органическое вещество и оксиды железа. Состав и внутреннее строение кремней во многом зависит от вмещающей их первичной карбонатной породы, основные черты которой сохраняются, а иногда даже подчеркиваются при окремнении.

Твердость этих природных образований по 10-балльной эталонной минералогической шкале, предложенной в 1811 г. немецким минералогом Ф.Моосом, составляет 7. Из-за высокой твер-

© Комаров В.Н., 2014



Бескрайние просторы второй гряды Крымских гор, сложенной верхнемеловыми отложениями с многочисленными кремнями. Восточная часть Бахчисарайского р-на.

Фото автора

дости кремни хорошо сохраняются при выветривании, и нередко возникают их самостоятельные скопления.

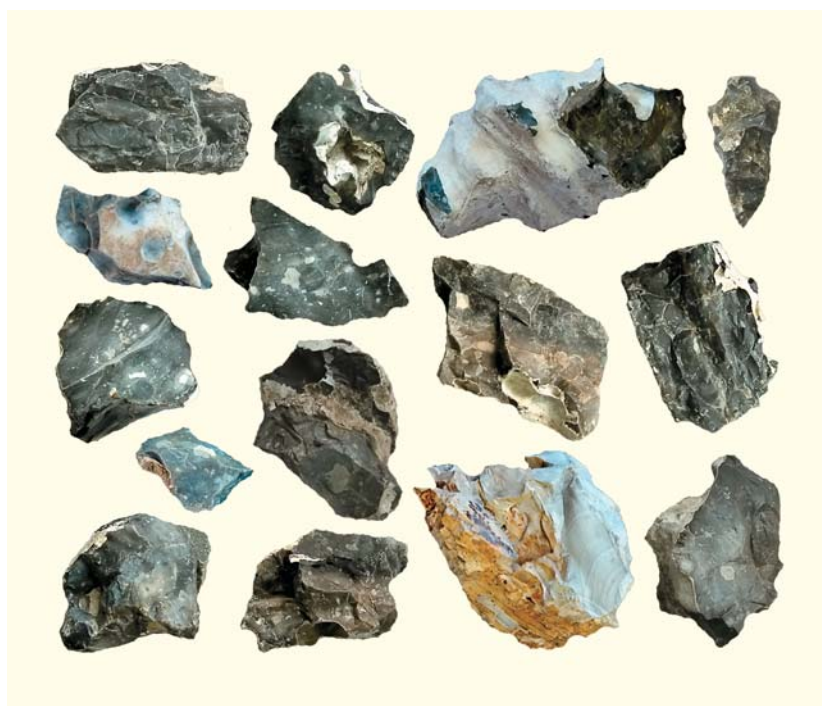
Кремни обычно образуют 3–10-сантиметровые конкреции (желваки) округлой, яйцевидной или причудливой неправильной формы с отростками и пустотами, линзовидные тела с пережимами или раздувами и даже прослойки. В верхнемеловых отложениях Днепровско-Донецкой впадины часто встречаются конкреции диаметром более 0,5 м [3], а гиганты фантастических форм до метра в поперечнике обнаружены в отложениях второй гряды Крымских гор, в окрестностях Бахчисарая и Белогорска [1].

Еще М.В.Ломоносов отмечал, что кремни характеризуются самой различной окраской — серой, розовато-серой, синей, голубой, зеленоватой, желтой, коричнево-красной, бурой и черной. Встречаются и пятнистые камни: серо-голубые в белую крапинку или желто-серые с бурыми пятнышками.

В кремневых конкрециях часто присутствуют остатки губок, радиолярий и раковин фораминифер. Кремневые скелеты радиолярий иногда характеризуются удивительной сохранностью и оказывают неоценимую помощь при определении возраста пород. Состав ископаемых остатков от периферии конкреций к центру обычно меняется с карбонатного на халцедон-кварцевый. В такой смене минерального состава окаменелостей отражается медленный последовательный процесс перекристаллизации выпавшего опала в халцедон, а затем и в кварц.

Кремневые конкреции формируются в результате совместного действия процессов растворения и диагенетического перераспределения вещества, вызванного неоднородностями физико-химической среды минералообразования. Наиболее благоприятны для возникновения кремней участки, характеризующиеся минимальными значениями кислотно-щелочного баланса (рН — главный фактор, влияющий на растворимость кремнезема). В современных илах граница низких значений рН (до 7.0–6.5) располагается в 30–50 см от поверхности — в зависимости от глубины бассейна, количества органики и скорости осадконакопления [4]. Можно предположить, что и для образования конкреций наиболее благоприятным был верхний слой осадка.

Источником кремнезема служит кремнекислота, которая содержится в иловых растворах вслед-



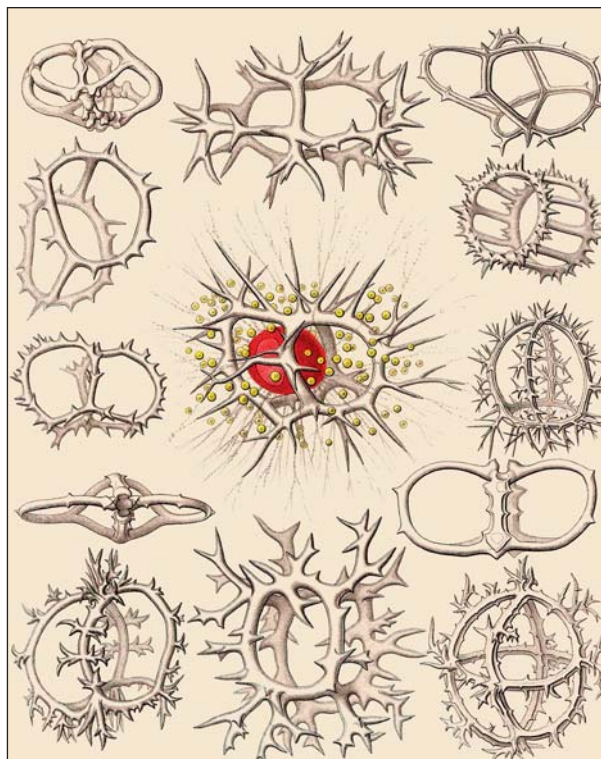
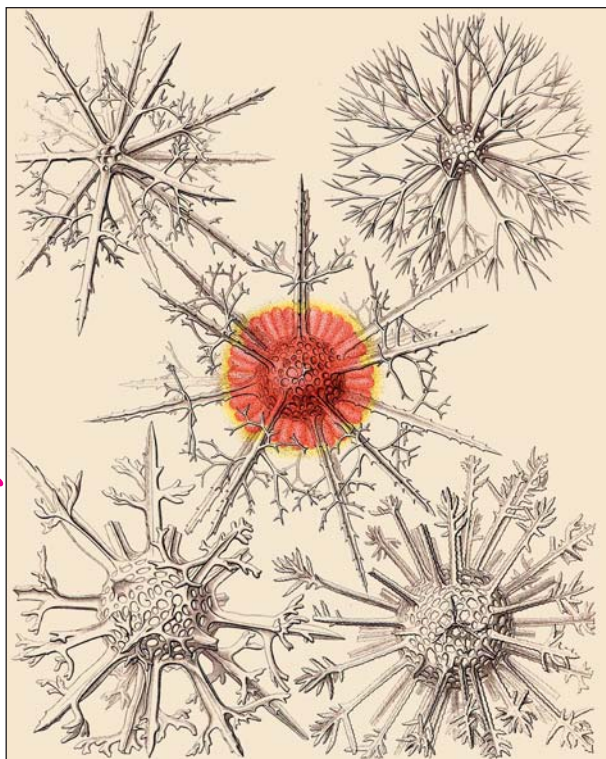
Верхнемеловые кремневые конкреции. Восточная часть Бахчисарайского р-на. Все образцы уменьшены в три раза.

Коллекция и фото автора



В.Н.Комаров с образцами крупных верхнемеловых кремней в Геолого-палеонтологическом музее «Крымской учебной базы МГРИ—РГГРУ».

Фото Е.В.Ковальчук

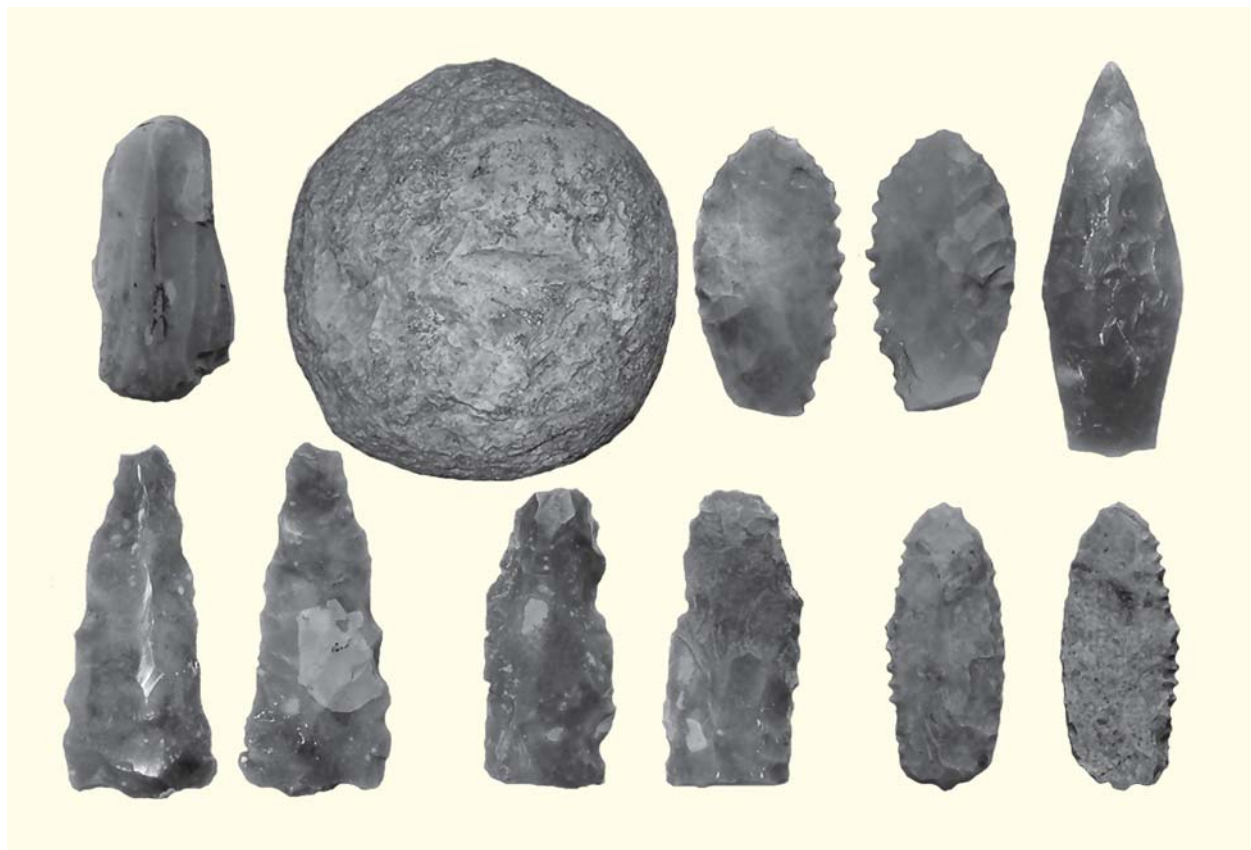


Раковины радиолярий, часто встречающиеся в кремневых конкрециях [5].

ствие растворения поступающих с суши силикатных терригенных частиц, содержащегося в осадке пеплового материала, а также кремневых скелетов. Роль организмов не исчерпывается при этом только поставкой кремнезема в осадок. Их скелеты служат «притягательными центрами», вокруг которых собираются рассеянные в осадке или породе частицы кремнезема [2, с.258]. Именно повторением формы губок или скоплений их спикул и объясняются своеобразные очертания многих кремневых желваков. Локальными участками образования конкреций могут стать и борозды течений (тогда возникают горизонтально-удлиненные разности), и пустоты, образующиеся при выделении газов (формируются вертикально-удлиненные конкреции) [6]. Диагенетический генезис кремней подтверждается их послойным расположением в осадочных толщах (иногда связь кремней с конкретным слоем настолько тесная, что они используются для надежного стратиграфического сопоставления отложений), а также чередованием слоев с конкрециями и без. Присутствие кремней характерно для карбонатных отложений, формировавшихся на различных участках древних морских бассейнов. Это в первую очередь относится к биогермным образованиям рифовых зон, отложениям передового и глубокого открытого шельфа и верхней части материкового склона [7].

Вот уже многие сотни тысяч лет кремень надежно служит человеку. В этом камне, способном

при раскалывании легко давать раковистые осколки с острыми режущими кромками, древний человек нашел замечательный материал, который позволял ему создавать орудия труда и оружие — скребки, молотки, топоры, наконечники стрел. В Горном Крыму, например, древние жители находились в выгодных природных условиях — кремень здесь практически лежал на поверхности, и добыть его не составляло особого труда. А вот в других районах первобытным людям для этого нередко приходилось проводить основательную работу. Горные выработки каменного века обнаружены в Белоруссии, Польше, Франции и других странах. В Бельгии известна шахта для добычи кремня глубиной 17 м [1]. О масштабах использования кремней древним человеком можно судить по десяткам тысяч изделий, найденных на многочисленных первобытных стоянках. В прошлом кремень активно использовался и для добывания огня. Считается, что само название этого камня могло произойти от латинского «кремаре» — сжигать; связывают его и с греческим «кременос» — скала [1]. Еще в начале XIX в. В.М.Севергин, рассуждая о сфере применения кремней, писал, что они употребляются преимущественно для высекания огня и в оружейном деле [1]. К концу же века В.Даль говорил об этом уже в прошедшем времени и характеризовал кремень как «служивший прежде для добычи огня (до сагогарных спичек)» [1, с.26].



Различные кремневые орудия и заготовки к ним. Восточная часть Бахчисарайского р-на. Все образцы представлены в натуральную величину.

Коллекция и фото автора

Используют кремни и сейчас. В виде гальки и шаров их применяют в мельницах для тонкого размла различных материалов. Мельчайший порошок служит абразивом при обработке дерева и кожи. Во многих местах, в частности в Подмоскowie и в Горном Крыму, встречаются камни с красивым полосчатым (как в агатах) или пятнистым рисунком, в котором сочетаются яркие и нежные оттенки различных цветов. Некоторые образцы этой разновидности уже представляют собой ри-

сунчатый или пейзажный камень. Он хорошо полируется и используется камнерезами в декоративно-прикладном искусстве. В петербургском Эрмитаже, например, хранится небольшой изящный столик с красивой крышкой из симметричных пластин желто-коричневого кремня [8].

По словам Т.Б.Здорик, кремню — этому «краугольному камню истории» — в соответствии с заслугами перед человеком должно отвести одно из самых почетных мест [9]. ■

Литература

1. Полканов Ю.А. Минералы Крыма. Симферополь, 1989.
2. Швецов М.С. Петрография осадочных пород. М., 1958.
3. Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород. М., 1967.
4. Фебридж Р.У. Фазы диагенеза и аутигенное минералообразование // Диагенез и катагенез осадочных образований. М., 1971. С.27—91.
5. Report on the scientific results of the voyage of H.M.S.Challenger during the years 1873—76. Zoology. V.XVIII. London, 1887.
6. Евдокимов И.В. Кремневые конкреции верхнемеловых отложений окрестностей с.Прохладное (Горный Крым) // Вестник МГУ. Серия IV. Геология. 1976. №4. С.109—112.
7. Фортунатова Н.К., Карцева О.А., Баранова А.В. и др. Атлас структурных компонентов карбонатных пород. М., 2005.
8. Кантор Б.З. Мир минералов. М., 2005.
9. Здорик Т.Б. Здравствуй, камень! М., 1975.

Лучше меньше да лучше!

Какие фотоальбомы о природе хотелось бы видеть?

К.Е.Михайлов,

кандидат биологических наук

Палеонтологический институт им.А.А.Борисяка РАН
Москва

Нас, граждан России, сближает не только «любовь к родному пепелищу, любовь к отеческим гробам», но и любовь к красоте природы нашей родины. Поэтому альбомы с художественными видами и фотографиями животных пользуются большой популярностью. В Интернете легко найти множество изображений диких животных, среди которых любимым объектом фотоохоты оказываются птицы — они вездесущи, поведение их сложно, оперение великолепно. Прогресс цифровой фотографической техники сегодня столь велик, что приобщиться к съемке птиц как и к наблюдению за ними, или бёрдвотчингу (англ. bird watching), может буквально каждый, кто не потерял изначально присущих любому человеку природного любопытства и ощущения красоты окружающего мира. В то же время фото-съемка природных объектов — это не только и даже не столько дорогостоящее оборудование, позволяющее получить завораживающе «глянцевую картинку», сколько умение наблюдать и понимать происходящее в природе. Понимать, чтобы рассказать об этом в интересной форме

© Михайлов К.Е., 2014

другому человеку посредством фотографии.

Красочный альбом «Птицы России», выпущенный издательством «Манн, Иванов и Фербер», представляет хорошую возможность для того, чтобы обсудить основные трудности, с которыми сталкиваются фотографы птиц и издатели альбомов о природе, и дать им профессиональные рекомендации.

Автор альбома, Валерий Геннадьевич Малеев, охотовед, кандидат биологических наук. В последние десятилетия судьба заставила его отойти от занятия естествознанием и плотно заняться политическими и государственными делами. Малеев был губернатором Усть-Ордынского Бурятского автономного округа, членом Совета Федерации, членом политсовета партии «Наш дом — Россия», заместителем председателя Комитета по делам Содружества Независимых Государств, а с 2007 г. он депутат Государственной Думы РФ от партии «Единая Россия», заместитель председателя Комитета ГД по регламенту и организации работы Госдумы и член Счетной комиссии ГД. Это не первый фотоальбом известного депутата, ранее вышли книги «Живая природа России», «Определитель птиц Иркутской области» и др.



В.Г.Малеев. «ПТИЦЫ РОССИИ».

М.: Изд-во «Манн, Иванов и Фербер», 2014. 203 с

Константин Евгеньевич Михайлов — автор фотоочерков в наших ведущих журналах о природе: «National Geographic Россия» и «GEO Россия»; соавтор-фотограф таких известных фотоальбомов, как «The World Heritage Sites of UNESCO» (2003) и «Природный парк Ленские столбы» (2007); автор-составитель иллюстрированных книг о природе: «Звери мира» (2007), «Рептилии и амфибии мира» (2010), «Заповедники России» (2009), «100 жемчужин природы России» (2011), «Горы мира» (2012). — *Примеч. ред.*

Важно отметить, что в любой маленькой стране Европы ежегодно выходит в десятки раз больше печатных изданий (книг, альбомов, путеводителей, определителей) на тему природы, чем в нашей огромной стране. Поэтому трудно не согласиться со словами, приведенными в кратком введении к альбому: «любое издание такого рода — не только сборник фоторабот автора, но прежде всего способ усилить интерес людей к окружающему миру, и в том числе популяризации природной фотографии и бёрдвотчинга» [с.5]. Но любое ли издание такого рода должно восприниматься на ура («лишь бы выходили!»)? Может быть, стоит следовать известному принципу — лучше меньше да лучше? Его можно перефразировать и так: уж если у нас выходит столь мало книг и альбомов о природе, то пусть это малое будет действительно самое хорошее, самое лучшее, что у нас есть на данный момент, — как по исходному материалу (фотографии, тексты), так и по его подаче (дизайн, полиграфия).

Каковы же основные проблемы с изданием фотоальбомов о природе? С полиграфией во многих наших издательствах дела давно уже обстоят неплохо, да и профессиональная работа дизайнера-верстальщика по компоновке разворотов хорошо прослеживается. Работать надо над первичным отбором фотографий для альбома (это профессиональная задача фоторедактора) и над содержательным аспектом подачи материала. Наибольшее разочарование связано именно с отсутствием какой-либо системы в построении материала в целом и с отсутствием пояснительного текстового сопровождения, без которого восприятие объектов природы не может быть хоть сколько-то познавательным для неискушенного в данной области человека.

Начать разбор стоит с качества «исходного материала» и компоновки разворотов. Из пред-

ставленных в книге фотографий автору наиболее удалась съемка пернатых Арктики, и дизайнер-верстальщик это прекрасно понимает, поскольку именно этими кадрами заполняются первые развороты альбома, которые и задают впечатления. И впечатления хорошие, тем более что птицы сняты в характерном ландшафтном окружении, это создает «эффект присутствия», а не просто балует глаза изображениями птичек на отвлеченном размытом цветовом фоне (последнее было бы уместно для «открыточной фотографии», для определителя, но не для альбома о птицах огромного природного региона).

Однако по мере знакомства с альбомом этот приемлемый уровень фотографической анималистики падает, и все скатывается на прозаические изображения птиц, которыми пестрит Интернет и которые по исполнению и самому «видению природы» соответствуют по сегодняшним меркам разве что самому начальному уровню фотобёрдвотчинга. Таких кадров в книге, увы, много (с.31, 46—47, 86—87, 89, 90—91, 102—103, 105, 106, 109, 112—113, 114, 122—123, 125, 135, 140, 148—149, 150—151, 154—155, 157, 158, 159, 160—161, 163, 164, 166, 173, 176—177, 179, 180, 184—185, 189, 192—193, 195). Хуже всего удались птицы семейства воробьиных. Возможно, автор не очень понимает, как их снимать и что интересного в фотоохоте за мелкими пернатыми.

Кроме «тривиальных» изображений обычных видов птиц есть в альбоме и кадры на уровне технического брака («шевелёнка»*, пересвечено, плохой свет и т.д.). Вот примеры: белоплечий орлан (с.39), птенец воробьиного сыча (с.57), кедровка (с.79), черный аист (с.98), чиж

* Шевелёнка — термин, характеризующий нечеткость изображения вследствие недостаточно малой выдержки и/или отсутствия должного упора при съемке объекта.

и лазоревка (с.77), белая трясогузка (с.149). Близки к этой категории и «никакие» кадры (технически не брак, но нет осмысленного композиционного решения и/или передачи характерной природной ситуации и характерного поведения птиц конкретного вида), например: белобрюшка и буревестник (с.27), песчанка (с.30) и орлан-белохвост (с.38); рыбный филин, который, увы, выглядит как голова чучела птицы (с.43), лебеди-кликуны с «обрезанными» головами (с. 44) и некоторые другие фотографии.

Вместе с тем в альбоме есть очень хорошие, красивые, сложные по композиции и осмысленные кадры, например: моевки (с.8—9), кайры (с.11), гаги (с.16), казарки (с.17), краснолицые бакланы (с.18), конюги в полете (с.22), портрет ипаток (с.25), каменушки (с.40), гуси (с.45, 80), тетерева на болоте (с.67), «проводка»** с крохальями (с.76), вальдшнеп (с.92), горбоносые турпаны (с.96), светлоголовая пеночка (с.167), куропатки (с.171), каменки (с. 174—175), синий соловей (с. 188), тусклая зарничка (с.194) и, конечно же, глухарь, токующий под «проливным снегом» (с.62), — это настоящий конкурсный кадр для номинации «Птицы». Как жаль, что эти интересные, запоминающиеся фотографии тонут в массе посредственных изображений. Спрашивается, разве это не видно ответственному редактору такой достаточно дорогой по затратам книги?

Таким странным сочетанием хороших и «никаких» кадров наши альбомы о природе, даже с хорошей полиграфией, пока еще сильно отличаются от луч-

** Проводка — особый технический и художественный прием съемки движущихся объектов, когда объектив ведется вслед за летящими (бегущими) животными на достаточно большой выдержке. За счет разницы в нерезкости («размытости») фона и резкого изображения перемещающихся объектов удается достичь наибольшего ощущения движения.

ших западных фотоальбомов. «Выпадения» не просто пестрят, они режут глаз. Невозможно представить себе «никакие» кадры и откровенную «шевелёнку» в альбомах о природе, издаваемых известным немецким книжным издательством «Tecklenborg Verlag», или в выпускаемых им же журналах «Naturfoto» и «Terra». Опытный фоторедактор (обязательная должность в таких издательствах!) не допустил бы такие кадры. Нижняя планка качества должна выдерживаться строго! Неровный подбор кадров, чередование добротных фотографий с технически провальными либо неинтересными нужно, с сожалением, признать отличительными чертами многих наших альбомов и иллюстрированных книг о природе.

И здесь не столько претензии к автору (хотя и авторы могли бы быть более самокритичными к отбору своих фотографий), сколько к издательству. К подготовке подобных книг (дорогостоящих альбомов) должны привлекаться грамотные фоторедакторы по жанру природной фотографии — важное звено «издательского механизма» между автором и дизайнером-верстальщиком. Задача дизайнера и его профессионализм состоят в другом. Нельзя требовать от многих из верстающих книги художников, которые могут быть очень далеки от природы вообще, чтобы они разбирались еще и в специфике различных требований к съемке разных природных объектов, включая птиц. Художнику может быть безразлично, что такое реальный мир птиц, а автор не всегда может повлиять на решение дизайнера. В результате получается то, что получается. А именно: в цветовом отношении развороты подобины и «уравновешены» хорошо (в этом, собственно, важная составляющая профессионализма художника-верстальщика), но в исходном подборе фотографий для альбома — оче-

видное непонимание того, что такое современная фотография птиц. Иногда на разворот довольно назойливо (раз за разом) подбираются фотографии по формальному критерию типа «обе летящие птицы», птицы «летающие друг на друга» и тому подобное. Немалое число разворотов, как уже говорилось, целиком скомпоновано из «никаких» и тривиальных кадров.

Иногда дизайнер попадает в ловушку предпочитаемых им форм подачи материала. Например, на развороте (с.76—77) слева дана интересная фотография летящих крохалей, выполненная «проводкой», а справа (чиж и лазоревка) — просто птицы «вне резкости», материал на уровне брака. Такие фотографии должны идти в корзину, даже если для автора за ними стоят личные переживания и особые мгновения жизни. Один из базовых принципов в обучении фотографа и фоторедактора — без жалости уничтожать всякого рода нерезкие кадры, т.е. банальную «шевелёнку». В том-то и дело, что в серьезном издательстве, публикующем альбомы о природе, такие фотографии, если их не смог критически оценить сам автор, сразу же должен увидеть и не пропустить беспристрастный фоторедактор. Напротив, на них легко покупается далекий от собственно фотографии природы даже искусный технарь-дизайнер.

С другой стороны, некоторые из вполне тривиальных изображений могли бы пойти в книгу, если бы они были именно иллюстрациями к интересному тексту, призванному просветить читателя о пернатых его региона (страны). И здесь мы подходим к главному «пункту разочарования», а именно низкой познавательной ценности книги. В начале альбома говорится, что птицы объединены «в большие группы, в зависимости от мест обитания, с севера на юг» [с.5], однако хоть как-то визуально осмысленно — даже для подготовленного глаза биолога —

обозначена лишь Арктика (самое начало альбома); в дальнейшем материал подан, что называется, «кто в лес, кто по дрова». А ведь это все-таки не альбом, скажем, пейзажной фотографии, где изображения общих планов природы имеют исключительно художественную ценность (буквально, как акварели). При этом многие альбомы с «ландшафтной фотографией»*, например многие книги из серии «The World Heritage Sites of UNESCO» («Места мирового наследия ЮНЕСКО») с замечательными профессиональными фотографиями ландшафтов всегда сопровождаются пояснительными текстами. Если издатели представляли себе данный альбом исключительно как художественное произведение, то они заблуждались. «Исходный материал» еще очень далек от собственно художественной фотографии животных. Этот жанр доступен в мире немногим мастерам, фотографии которых действительно иногда komponуются как «чистые» фотоальбомы**.

Работы Малеева — это классическая фотоохота (натуралистическая съемка), и иллюстрации в таких книгах всегда сопровождаются хотя бы небольшими текстами, которые делают восприятие фотографий осмысленным для массового читателя. Если читатель не орнитолог, то изображения на большинстве иллюстраций останутся для не-

* О различиях между «пейзажной» и «ландшафтной» фотографией (названия условны), небезыntenесных в плане понимания того, что такое форма и содержание в фотографии природы и как они взаимодействуют в разных жанрах и при разных подходах, см.: Михайлов К. Пейзажная и ландшафтная фотография: не совсем одно и то же (www.geophoto.ru).

** См., например, работы финского фотографа Маркуса Варесвуо (www.facebook.com/markus.varesvuo/media_set?set=a.105958889463459.9698.100001480447484&type=3) и работы французского фотографа Винсента Мунье (www.vincentmunier.com).

го неопознанными: что это за птица, из какой группы, где она живет и что она делает на фотографии. Даже названия в большинстве случаев ему мало что скажут о данном представителе мира пернатых. Судите сами, знает ли большинство читателей, что такое люрик, топорок, конюга, ипатка, белобрюшка (чистиковые птицы); большая поганка (вместо «чомга»); песчанка и черныш (кулики); лапландский подорожник (овсянки) и урагус (чечевицы) или даже моевка, бургомистр и говорушка (чайки)? В то же время таких видов птиц, как обыкновенный тетерев, обыкновенная сплюшка, обыкновенный крапивник, обыкновенная оляпка, обыкновенный филин и обыкновенная колпица среди обычных русских названий птиц нет. Именованную половину фауны своего региона, добавляя эпитет «обыкновенный», — наш давний недуг. За соблюдением традиций и культуры языка должен, безусловно, следить и автор, но на помощь ему должны приходиться также редакторы, корректоры, консультанты и т.д. Ведь есть же словари, списки, каталоги и конспекты, например: «Список птиц Российской Федерации» (Коблик и др., 2006), «Конспект орнитологической фауны СССР» (Степанян, 1990), «Каталог птиц СССР» (Иванов, 1976).

От чего совершенно необходимо, хотя, вероятно, труднее всего отказаться, так это от традиционной практики подготовки к печати таких книг в наше время в нашей стране. Известный человек договаривается с издателями (тоже известными людьми) и приносит кипу своих фотографий — удачных, не очень и даже «никаких». Оставляет их в редакции, в штате которой, вероятно, не существует позиции фоторедактора по теме фотоальбома. Фотографии не проходят беспристрастной оценки на самом важном — начальном — уровне подготовки альбома, а ответственному ре-

дактору и дизайнеру-верстальщику, наверное, просто дается указание работать с тем, что есть. К тому же им обоим, как и всем «техническим специалистам», скорее всего, безразлично, что это за птицы, где они живут и что вообще интересно в биологии видов и групп, которые они представляют. Работники издательства по своим интересам чаще всего бывают далеки от тематики «природной фотографии» и природы вообще, и их внимание изначально сосредоточено исключительно на «форме подачи материала».

Вся дальнейшая работа целиком совершается дизайнером-верстальщиком. Он профессионал в своей области и хорошо komponует на разворот фотографии с точки зрения дизайнерского искусства («единого цветового решения» разворота, уравнивания его половинок по «количеству движения», использования приглушенных цветов — без искусственной, неестественной яркости и т.д.), т.е. опять же все может быть верно по форме подачи материала, но оказаться безграмотно по содержанию. В результате в обсуждаемом альбоме только 10—15 первых разворотов имеют хоть какую-то художественно-познавательную ценность и передают зрителю (читателю его назвать трудно) какое-то целостное впечатление о мире птиц и природном регионе, который эти пернатые населяют и для которого они характерны.

Если говорить совсем прямо, без обиняков, то по существу «читатель» ничего не узнает из такого альбома о пернатых России. Не узнает, чем они отличаются друг от друга, в чем их изюминка (у каждого своя), как и чем они живут, каков их не открытый, а «биологический» образ. И донести такое знание издатель, похоже, ни в коей мере не собирався. Парадоксально, но при несравненно лучшей полиграфии и неизмеримо больших общих возможностях многие нынешние книги-альбомы

о дикой природе заметно уступают иллюстрированным книгам* 1970—1980-х годов. Уступают бессистемностью и безыдейностью в подаче материала. Что птица делает в кадре? Токует ли, строит гнездо, выкармливает птенцов, добывает пищу? — Не имеет значения! Что объединяет разные развороты альбома? — Не имеет значения!

И здесь мы неизбежно выходим на еще более общий уровень рассмотрения проблемы. Фотография перестает быть осмысленным занятием, некоей составляющей нашего страстного стремления воспринимать природу в равной степени эстетически и познавательно. Фотография превращается в «фотканье» ради самого «фотканья» (что-то типа «лайканья» в социальных сетях), где главные оценочные характеристики будут «круто», «прикольно» и тому подобное (а не «интересно», «познавательно» и т.д.). И результат не заставляет себя ждать. Странно видеть, как на экскурсиях в наших музеях уже школьники 1-го и 2-го классов «щелкают» и «щелкают» мобильными телефонами, совершенно не понимая, что они снимают и для чего. Потому что даже они уже привыкли воспринимать фотографию (и вообще любое изображение) в отрыве от всякого осмысленного контекста, как не связанное с действительностью «виртуальное явление».

Можно подумать, что издательства, как и организаторы многих выставок, сознательно или нет, поощряют (воспитывают) такое восприятие природы. Но я очень сомневаюсь, что такие наглядные уроки приведут к настоящей любви и подлинному желанию дорожить этой самой природой и защищать ее. Жаль, что это, по-видимому, не всегда понимают и сами авторы, и те, кто пишет предисловия к альбомам

* См., например, книги Ю.Б.Пукинского («По таежной реке Бикин», «Птицы уссурийской тайги»), выпущенные Хабаровским книжным издательством в 1984 г.

Работы наших лучших фотомастеров в съемке птиц

Представляя эти фотографии и подписи к ним, мы предлагаем издателям художественных альбомов и определителей птиц задать некую планку необходимого уровня качества и осмысленности материала.



Ястребиная сова (вверху; фото Олега Першина) и бразильский колибри-рубин (фото Елены Давыдовой). Современные цифровые камеры позволяют делать невероятно резкие и одновременно динамичные кадры, и все же главным был и остается навык к терпеливому наблюдению за живым объектом, а целью — не победы в фотоконкурсах, а живое общение с природой.



▶
Ласточки береговушки (фото Олега Першина). Полжизни они проводят в воздухе, где кормятся, общаются и собирают материал для гнезда.

Дрозд рябинник (слева; фото Олега Першина) и свиристель (фото Павла Пархаева). Морозная зима — тяжелое время для певчих птиц. Однако те, кто может усваивать оставшиеся ягоды и семена, нередко остаются зимовать в средних широтах. Стаи дроздов рябинников и свиристелей в массе кочуют в мягкие зимы по Подмосквовью, особенно после хорошего урожая рябины.



Серый личинкочед (фото Юрия Шибнева). Чтобы снимать птиц у гнезда, необходимы знания и опыт. Съемка ведется только с расстояния (дальнофокусным объективом) и, как правило, из скрадка. Снимать у гнезд крупных и редких птиц (орлов, журавлей и др.) сейчас категорически запрещено. ▼





Соловей (вверху) и обыкновенный сверчок (фото Александра Зародова). Песни певчих птиц, со всеми диалектами, вариациями и нюансами, не только маркирует гнездовую территорию, но и служат кодовым языком для различения особей и «состояний» — пола, возраста и социального ранга, а иногда и района рождения либо гнездования. Птицы не только поют, но и внимательно вслушиваются в песни соседей.

Сероголовая гаичка (внизу) и желтоголовый королек (фото Ильи Уколова).



Фотосъемка позволяет подсмотреть массу интересного в жизни и поведении пернатых. Гаички (синицы) — древесные птицы, но при необходимости успешно добывают корм и на земле. Крошечные королеку большую часть жизни проводят в вершинах высоких елей, где они размещают и свои шаровидные гнезда.

такого рода. Так или иначе, но о явно подразумеваемой во введении (с.5) и предисловии (с.7) просветительской роли альбома вряд ли можно говорить хоть сколько-нибудь серьезно. Трудно также согласиться с заверениями издателей, что они издают только те книги, которые считают «лучшими в своей области» (с.202). В области фотоанималистики (по крайней мере что касается фотосъемки птиц) они явно преувеличивают либо, возможно, искренне заблуждаются.

Нужен иной подход — воспитывать осмысленное восприятие природы человеком, где эстетическое (по форме) и познавательное (по содержанию) идут рука об руку, как две удачно

скомпонованные на разворот фотографии. Для этого, повторюсь, издательствам необходимы опытные фоторедакторы (как явление издательской практики) и разбирающиеся в специфике темы ответственные редакторы или хотя бы (при отсутствии тех и других в постоянном штате) специалисты-консультанты. Тогда и можно будет сказать, что дело сделано профессионально и хорошо не только в плане верстки и полиграфии. Пока этого, увы, нет. Сначала должна быть четкая идея книги (альбома), а затем уже его разработанная концепция (и поиск фотографических материалов под эту концепцию). И только потом наконец, сама сверстан-

ная книга. Я бы искренне порекомендовал любому серьезному издательству, которое планирует выпустить хороший, соответствующий уровню XXI в., фотоальбом «Птицы России», не ограничиваться подбором разношерстного по качеству материала у одного автора (пусть и, допуская, имеющего возможность оплатить тираж целиком или частично, что сегодня немаловажно), но отобрать из работ разных лучших фотографов, которых у нас на данный момент уже немало, фотографии птиц под идею и осмысленную структуру книги, а также заказать специалистам небольшие, но яркие и интересные пояснительные тексты. ■

Ю
е
ц
е
т
з
и
ш

Правила для авторов

Журнал «Природа» публикует работы по всем разделам естественных наук: результаты оригинальных экспериментальных исследований; проблемные и обзорные статьи; научные сообщения и краткие рефераты наиболее примечательных статей из научных журналов мира; рецензии; персоналии; материалы и документы по истории естественных наук. Поскольку статьи адресуются неспециалистам, желающим знать, что происходит в смежных областях науки, суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Без предварительной апробации научным сообществом статьи не принимаются, а принятые к публикации в «Природе» рецензируют-

ся и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию статьи можно прислать по электронной почте прикрепленными файлами или на любом из следующих носителей: компакт-дисках CD-R или CD-RW; дисках DVD+R или DVD+RW; дисках Zip 100 Mb; на устройствах, поддерживающих USB. Для сжатых файлов необходимо представить свой архиватор. Самораспаковывающиеся архивированные файлы не принимаются.

Текст статьи, внутри которого библиографические ссылки нумеруются по мере цитирования, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате MS с расширением doc, txt или rtf. Иллюстрации присылаются отдельными файлами. Если пере-

сылаемый материал велик по объему, следует архивировать его в формат ZIP или RAR.

Принимаются растровые изображения в форматах: EPS или TIFF — без LZW-компрессии. Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (B/W, Bitmap) — не менее 800 dpi. Принимаются векторные изображения в формате COREL DRAW CDR (версии 9.0–11.0) и Adobe Illustrator EPS (версий 5.0–8.0).

Редакция высылает автору статью для согласования только в виде корректуры. Все авторские исправления необходимо выделять цветом, курсивом, полужирным шрифтом и т.д. и не трогать формулы и специальные символы (греческие буквы, математические знаки и т.п.), в которых ошибки не допущены.

Поступление статьи в редакцию подтверждает полное согласие автора с правилами журнала.

Над номером работали

Ответственный секретарь

Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы

О.О.АСТАХОВА

Л.П.БЕЛЯНОВА

М.Б.БУРЗИН

Т.С.КЛЮВИТКИНА

К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА

О.И.ШУТОВА

Литературный редактор

Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор

Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией

И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод:

С.В.ЧУДОВ

Корректоры:

М.В.КУТКИНА

Л.М.ФЕДОРОВА

Графика, верстка:

А.В.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Российская академия наук,
президиум
Адрес издателя: 117997,
Москва, Профсоюзная, 90

Адрес редакции: 119049,
Москва, Мароновский пер., 26
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77
Факс: (499) 238-24-56

E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 19.02.2014
Формат 60×88 1/8
Офсетная печать
Заказ 2132
Набрано и сверстано в редакции

Отпечатано в ППП типографии «Наука»
Академиздатцентра «Наука» РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6

www.ras.ru/publishing/nature.aspx

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.