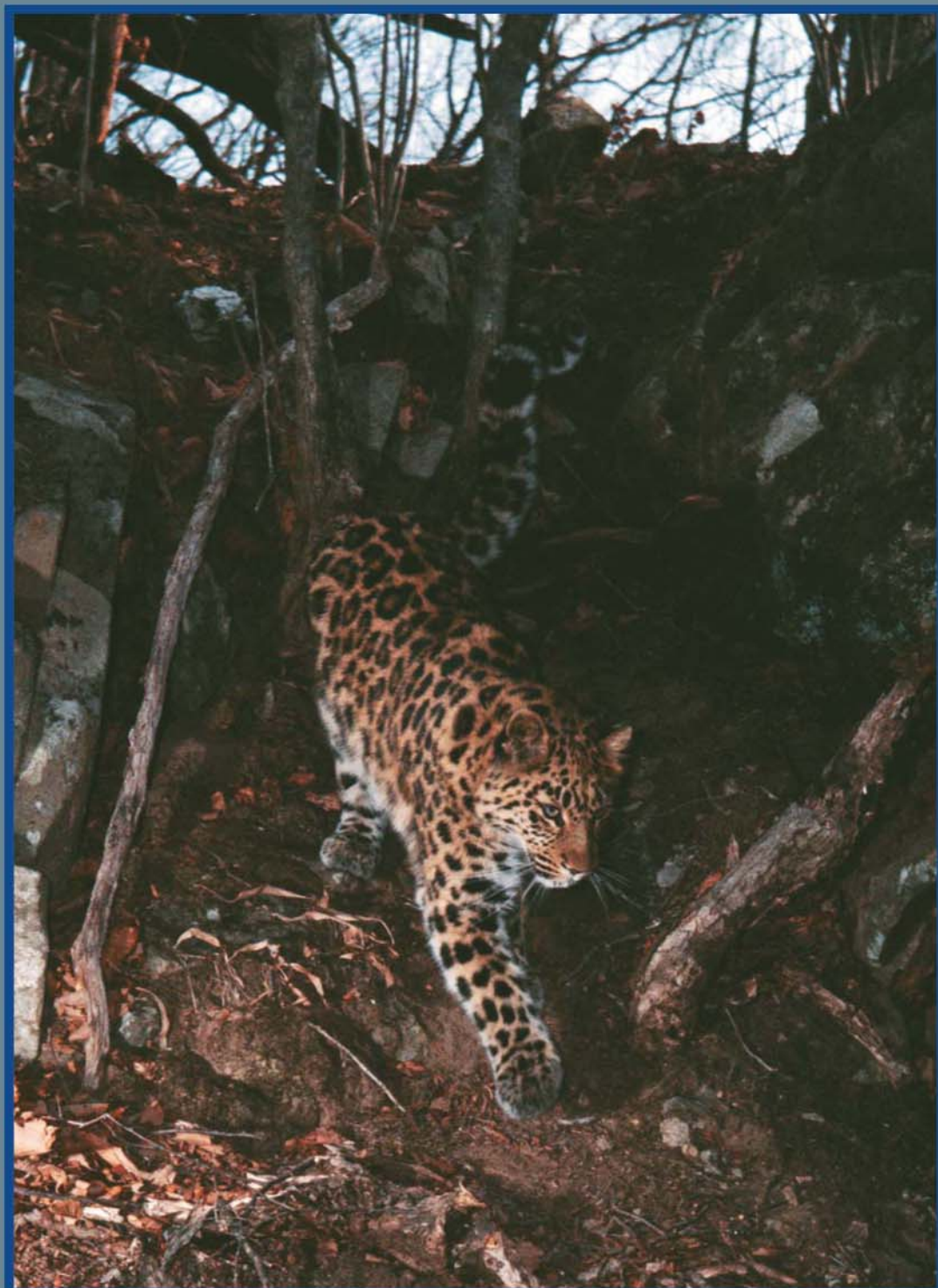


ПРИРОДА

7 03



В НОМЕРЕ:**Глобальные проблемы****3 Клюев Н.Н.****На пути к международному экологическому налогу**

Материальная ответственность страны за ущерб, наносимый окружающей среде, должна существенно варьировать в зависимости от ее роли в охране биосферы и сохранении природного наследия.

Калейдоскоп**10**

«Карта Винланда» все же фальшивка (10). Ноев ковчег отменяется? (10). Волки Франции (10). Венера снова в повестке дня (11). Летающие змеи (11). Подводный вулкан Моноваи (11). Лоси и алкоголь (11). Контрабанда угрожает слонам (45). Переписка Гильберта (45).

12 Полищук Л.В.**Скорость размножения и угроза вымирания вида****22 Бордонский Г.С., Бондаренко Н.А., Оболкина Л.А., Тимошкин О.А.****Ледовые сообщества Байкала****Лекторий****25 Леонов М.Г.****Поэзия Кавказских гор**

Краткий экскурс в историю геологического развития Кавказских гор сопровождается цитатами из произведений писателей и поэтов разных эпох, иллюстрирующими особенности геологического строения Кавказа и разнообразие его ландшафтов.

36 Абрамова Е.Б., Карпов В.Л.**Протеасома: разрушение во имя созидания**

Эта частица, обнаруженная в клетках 20 лет назад, расщепляет отработавшие уже белки, а также частично разрушенные или с измененной третичной структурой. С действием протеасомы, участвующей во множестве клеточных процессов, связано немало число заболеваний человека, в том числе онкологических и иммунных.

46 Понизовский А.А., Кудеяров В.Н., Благодатский С.А., Алексеев А.О., Биль К.Я., Марфи Р.**Почва как компонент «Биосферы-2»**

Самая большая в мире закрытая система, созданная как прототип космической станции, сегодня используется для изучения влияния повышенной концентрации CO₂ на развитие экосистемы.

53 Белушкин А.В., Козленко Д.П.**Мир ориентационного беспорядка в кристаллах****Нейтронные исследования**

Даже в идеальных кристаллах бывает нарушение дальнего порядка — например, если атомов меньше, чем положений для них. Исследовать его в динамике удается благодаря специальным методам обработки дифракционных данных, развитым недавно.

Научные сообщения**62 Кренке А.Н., Чернавская М.М.****Климатические экстремумы на территории России****Басов И.А.****195-й рейс «ДЖОИДЕС Резолюшн» (66)****Заметки и наблюдения****68 Гладких В.А.****Кедровые леса на месторождениях нефти и газа****71 Федотов П.С., Марютина Т.А.****Вращающаяся спиральная колонка в анализе природных образцов****Новости науки****76**

Предстоящие исследования Марса (76). Вибс Д.З. Гамма-всплески — взрывы сверхновых? (76). Экзопланета со странностями (77). Новый «родственник» Юпитера (78). Ранняя история Земли: образование коры и мантии (78). Серебристые облака смещаются к югу (78). Длинные нити из нанотрубок (79). Проводимость молекулы водорода (79). Амазонии требуется защита (80). Что случилось три миллиарда лет назад? (80). Кому достанутся сокровища шельфа? (81). Килауэа жжет заповедные леса (82). История климата Африки — в снегах Килиманджаро (82). Четырехкрылый планёр из мезозоя (83). Археологические находки в Армении (84).
Коротко (70)

Рецензии**86 Сурдин В.Г.****О компьютерах, мышлении и законах физики****Новые книги****88****В конце номера****90 Силкин Б.И.****«Наполеоново» землетрясение**

CONTENTS:

Global Problems

3 Klyuev N.N. On the Path to an International Environmental Tax

The country's liability for the damage inflicted on the environment should vary substantially depending on its role in protecting the biosphere and preserving the natural heritage.

Kaleidoscope

10 «The Map of Vinland» Is a Fake after All (10). Noah's Arc Is Abolished? (10). The Wolves of France (10). Venus Is again on the Agenda (11). Flying Snakes (11). The Submarine Monovai Volcano (11). Elks and Alcohol (11). Contrabanda Threatens the Elephants (45). Gilbert's Correspondence (45).

12 Polishchuk L.V. A Species' Reproduction Rate and Danger of Extinction

22 Bordonsky G.S., Bondarenko N.A., Obolkina L.A., and Timoshkin O.A. The Ice Communities of Lake Baikal

Lectures

25 Leonov M.G. The Poetry of the Caucasus Mountains

A brief sketch on the geological evolution of the Caucasus is accompanied by quotations from writers and poets of various epochs, illustrating the specific geological structure of the Caucasus and the diversity of its landscapes.

36 Abramova E.B. and Karpov V.L. Proteasome: Destruction in the Name of Creation

This particle, discovered in cells 20 years ago, decomposes exhausted proteins, as well as those partially destroyed and those with an altered tertiary structure. The proteasome, which is involved in many cellular processes, is responsible for numerous human diseases, including oncological and immune ones.

46 Ponizovsky A.A., Kudeyarov V.N., Blagodatsky S.A., Alekseev A.O., Bil K.Ya., and Marfi R. The Soil as a Component of «Biosphere-2»

The world's largest closed system, created as a prototype of a space station, is used today to study the impact of elevated CO₂ on ecosystem function.

53 Belushkin A.V. and Kozlenko D.P. Orientational Disorder in Crystals Neutron Scattering Studies

Even perfect crystals exhibit some long-range disorder, for example, when there are fewer atoms than the equivalent crystallographic positions for them. To reveal fine details of static and dynamic disorder new advanced methods of diffraction data analysis have recently been developed.

Scientific Communications

62 Krenke A.N. and Chernavskaya M.M. Climate Extremes in Russia

Basov I.A. 195th Cruise of the JOIDES Resolution (66)

Notes and Observations

68 Gladkikh V.A. Cedar Forests within Oil and Gas Fields

71 Fedotov P.S. and Maryutina T.A. The Rotating Spiral Column in the Analysis of Natural Samples

Science News

76 Future Mars Research (76). Wiebe D.Z. Gamma-Ray Bursts: Supernova Explosions? (76). An Odd Exoplanet (77). A New «Coeval» of Jupiter (78). The Earth's Early History: Crust and Mantle Formation (78). Noctilucent Clouds Move Southward (78). Long Threads of Nanotubes (79). The Conductivity of Hydrogen Molecules (79). Amazonia Needs Protection (80). What Happened Three Billion Years Ago? (80). Who Gets the Shelf Treasures? (81). Kilauea Burns Forest Reserves (82). The History of African Climate: In Kilimanjaro's Snows (82). A Four-Wing Glider from the Mezozoic (83). Archaeological Finds in Armenia (84). In Brief (70)

Book Reviews

86 Surdin V.G. On Computers, Thinking, and the Laws of Physics

New Books

88

End of Issue

90 Silkin B.I. Napoleon's Earthquake

На пути к международному экологическому налогу

Н.Н.Клюев

Из-за углубления экологического кризиса и отсутствия эффективных международных институтов охраны природы в последние годы поднимается вопрос о материальной ответственности за ущерб, наносимый окружающей среде. Речь идет не только о выбросах вредных веществ в атмосферу, но и об общем «вкладе» страны в глобальную деградацию, ее роли в охране биосферы и сохранении природного наследия. Исходя из этих соображений, платить должен тот, кто загрязняет и нарушает окружающую среду, а тот, кто этого не делает, получает компенсацию за хорошее содержание собственной территории. Пока такого налога в мире еще не существует, неплохо разобраться с ролью разных стран, и в том числе России, в международном экологическом кризисе.

Россия на экологической карте мира

С конца 80-х годов прошлого столетия бытовало мнение, что Россия входит в число стран с наихудшей экологической ситуацией. Так ли это на самом деле? Каковы реальная роль российской территории в биосфере и ее «вклад» в деградацию природной среды планеты?

© Н.Н.Клюев



Николай Николаевич Клюев, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Института географии РАН. Специалист в области социально-экономической географии, охраны окружающей среды, природопользования.

Как известно, характер и степень устойчивости ландшафтов к антропогенным воздействиям прежде всего определяются климатическими факторами. Из-за преобладания низких температур на территории России невысока и скорость естественной деградации загрязнителей в воздухе, воде и почвах. Особо уязвимые природные комплексы многолетней криолитозоны занимают в нашей стране 60% территории, а около половины площади — слабо устойчивые к широкому спектру хозяйственных воздействий горные геосистемы. К этому нужно добавить сейсмоактивные районы (20% территории, 5% из них подвержены чрезвычайно опасным 8—10-балльным землетрясениям) и лавиноопасные территории — 18%. Стихийные бедствия могут инициировать экологические катастрофы и усиливать тяжесть их последствий. Однако и вечная

мерзлота, и горы локализуются в основном на слабо освоенном востоке страны. Эти легко ранимые ландшафты пока практически не нарушены хозяйственной деятельностью. К тому же значительную часть страны, особенно на Восточно-Европейской равнине, занимают геосистемы, замкнутые на внутренние водоемы, поэтому наши загрязнения, как правило, за пределы страны не выходят.

Каковы же экологически значимые характеристики России на фоне таких же показателей ряда промышленно развитых стран? Планетарное значение безусловно имеют российские леса, занимающие 45% площади страны. По продуктивности они в четыре раза уступают влажным тропическим, зато используют на дыхание только 30—40% выделяемого кислорода вместо 80—90% в тропиках. Как отметил известный биолог Г.А.Заварзин, роль «легких

планеты» все более уверенно отводится лесам бореального пояса с их медленной и сезонно-подавленной деструкцией [1].

В списке экологически важных характеристик нашей страны — переувлажненные земли и болота (22% территории), которые регенерируют атмосферный кислород и служат геохимическими барьерами для загрязнителей, а также крупнейший на Земле массив практически не освоенных, «диких» земель (почти 2/3 площади). Поэтому российскую территорию вполне можно считать главной естественной «очистной установкой» планеты, которой, заметим, мир активно пользуется совершенно бесплатно.

В России сосредоточено большое количество биологических видов (10% беспозвоночных от общего количества в мире, в том числе 8 % насекомых, 14.5 — рыб, 8 — птиц, 8 — млекопитающих 1 — пресмыкающихся и земноводных, [2].) Среди стран, которые во многом определяют экологическое будущее планеты, Россию характеризуют сравни-

тельно высокие показатели биологического разнообразия и степени его сохранности.

По величине выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (см. табл.) — абсолютных и на душу населения — с большим отрывом лидируют США. Российские валовые показатели ниже американских по SO_2 в 6.5 раз, по NO_x — в 8.6, по CO_2 — в 8.7 раз. Выбросы европейских стран ниже российских, но в расчете на душу населения сопоставимы. Россия расположена в гораздо более суровых климатических условиях, чем США и Западная Европа. Это предопределяет и больший расход энергии (а следовательно, и выбросов в атмосферу), и объемов использования водных ресурсов. Больше энергии требуется и транспорту, обеспечивающему связь на огромной территории. В целом показатели воздействий на среду, отнесенные к единице территории, несопоставимо малы по сравнению с другими странами.

Рассчитанная для 140 государств динамика выбросов CO_2 опровергает распространенное

мнение, что богатые страны сокращают нагрузку на природу, а бедные — увеличивают. Напротив, в США выбросы растут, а в странах Центральной и Восточной Европы и республиках бывшего СССР — уменьшаются из-за спада производства (на долю России приходилось 65% союзных выбросов). В результате всего за пять лет доля постсоветских стран в глобальных выбросах сократилась на 6%. Выбросы заметно увеличиваются в развивающихся (и прежде всего азиатских) странах с невысокими показателями ВВП на душу населения.

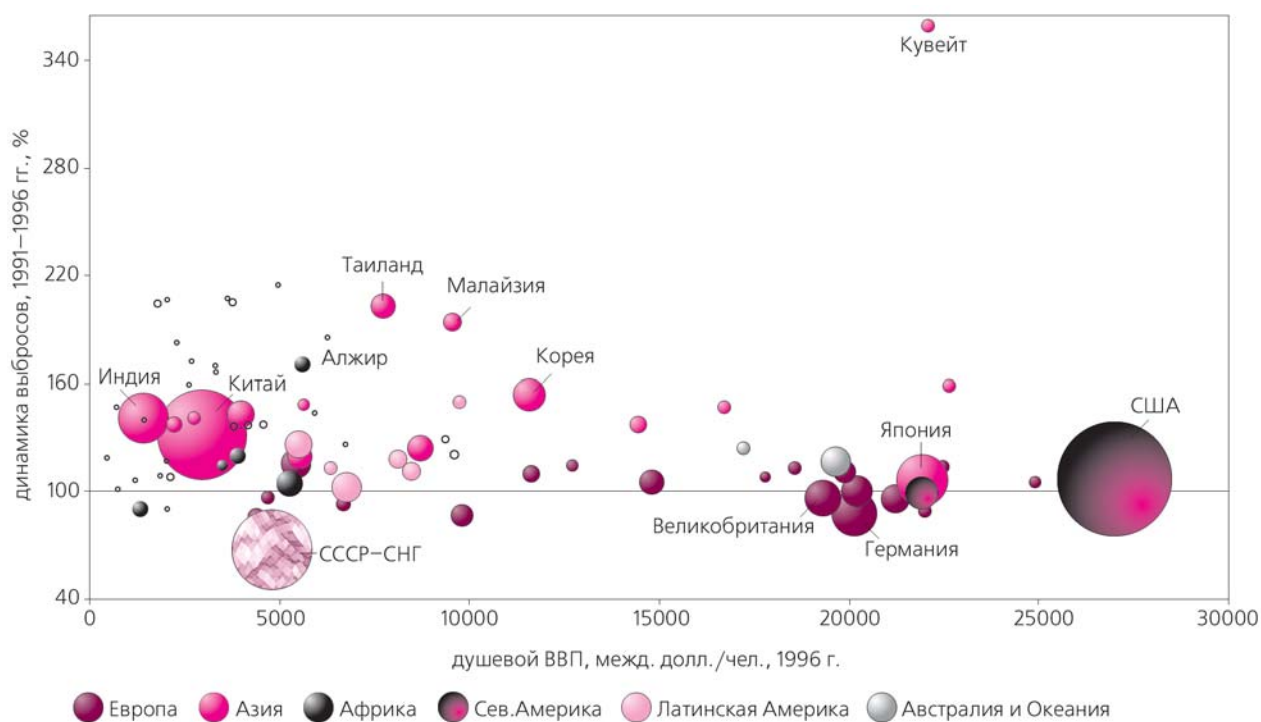
В хозяйстве России используется лишь 2% имеющихся ресурсов речного стока (в мире — 8%, США — 19, Германии — 48). Если сравнить качество воды Оки и Эльбы, то концентрации свинца, меди, цинка, хрома в первой на 40% выше геохимического фона, а во второй — в 3–16 раз [4].

Структура топливного баланса в нашей стране более экологичная, чем в мире в целом: доля природного газа составляет более 50% и 22.5% соответственно.

Таблица

Выбросы вредных веществ в атмосферу и использование водных ресурсов по отдельным странам в 1996 г. [3]

	Россия	Германия	Франция	Великобритания	США
Выбросы вредных веществ в атмосферу:					
SO_2 , млн т:	2.6	1.5	1.0	2.0	17.3
на ед. территории т/км ²	0.15	4.4	1.9	8.3	1.9
на душу населения кг/чел.	18.2	18.7	17.1	33.8	63.2
на ед. ВВП (т/млн долл.)	4.1	0.9	0.8	1.7	2.2
NO_x , млн т	2.4	1.9	1.6	2.0	21.2
на ед. территории т/км ²	0.14	5.4	3.0	8.4	2.3
на душу населения кг/чел.	16.7	22.9	27.1	34	77.4
на ед. ВВП (т/млн долл.)	3.8	1.1	1.3	1.7	2.7
CO млн т	9.3	6.7	8.9	5.0	80.6
на ед. территории т/км ²	0.55	19.2	16	20.7	8.8
на душу населения т/чел.	63.2	81.5	146.5	83.9	294
на ед. ВВП (т/млн долл.)	14.4	3.8	6.9	4.1	10.3
CO_2 , млн т	1579	861	361	557	5300
на ед. территории т/км ²	93.4	2465	656	2305	578
на душу населения кг/чел.	10.7	10.5	5.9	9.3	19.3
на ед. ВВП (т/млн долл.)	2451	493	279	455	682
Использование водных ресурсов, км³	77.1	46.3	40.7	9.3	468.6
в % от речного стока	2	43	23	6	19
на душу населения м ³ /чел.	524	579	693	160	1870
Сброс сточных вод., км³	70	38	34	...	340
Кратность разбавления (сток/сброс)	58	3	5	...	7



Динамика выбросов CO_2 и душевой ВВП по отдельным странам. Величина знака пропорциональна объему выбросов в 1996 г.,

Поставками энергоресурсов на мировой рынок Россия оказывает существенную экологическую помощь зарубежным государствам, прежде всего европейским. В процессе экспорта (в основном в европейские страны и республики СНГ) нефти и газа, по сути, «продаются» и российские ландшафты, сильно нарушаемые и загрязняемые при добыче этих ресурсов. Известно, что наиболее токсичные выбросы поступают в атмосферу при сжигании угля, наименее токсичные — газа, нефтяное топливо (мазут) занимает промежуточное положение. Замена в странах Европы (без стран СНГ и Прибалтики) угля и нефтепродуктов российским газом (более 120 млрд м^3 в год) позволила сократить выбросы вредных веществ в атмосферу более чем на 30 млн т в год, в том числе твердых частиц — на 15 и соединений серы — на 10 млн т [5].

Поскольку в средних широтах Северного полушария преоблада-

ет западный перенос воздушных масс, загрязняющие вещества, выброшенные в атмосферу в Европе при сжигании получаемых из России энергоносителей, частично поступают с воздушными потоками на нашу территорию. (Справедливости ради отметим, что из-за замены угля газом поток сокращается.)

Основные импортеры «экологического ресурса» России (продукции добывающих отраслей промышленности, круглого леса, черной и цветной металлургии, химической и нефтехимической промышленности, электроэнергетики) — это Германия (11.5% от экспорта РФ), Украина (10.9), Италия (6.4), Великобритания (5.7), Белоруссия (4.4), Китай (4.3), США (3.6), Швейцария (3.4). «Газпром» планирует крупномасштабные поставки газа и в Китай, Корею, Японию [6]. Другими словами, наша «экологическая помощь» зарубежным государствам расширяется на восток.

Российское сельское хозяйство отличается относительно невысокой интенсивностью, что позитивно сказывается на состоянии ландшафтов и на качестве продуктов питания. Так, в 1997–1998 гг. на 1 га пашни в мире в среднем вносили 100 кг минеральных удобрений (в Китае — 290, Великобритании — 330, Нидерландах — 550), а в России в 1999 г. — 16 кг. По количеству удобрений и ядохимикатов на единицу пашни и доперестроечная Россия уступала другим странам. При этом экологические проблемы земледелия всегда были связаны не с количеством применения химикатов, а с технологией их использования.

Производство сельхозпродукции в России вполне конкурентоспособна с точки зрения экологической чистоты. За пределами страны она ценится высоко, хотя распространение необоснованных утверждений об удручающем состоянии природной среды в Рос-

сии не способствует продвижению отечественного продовольствия на мировой рынок.

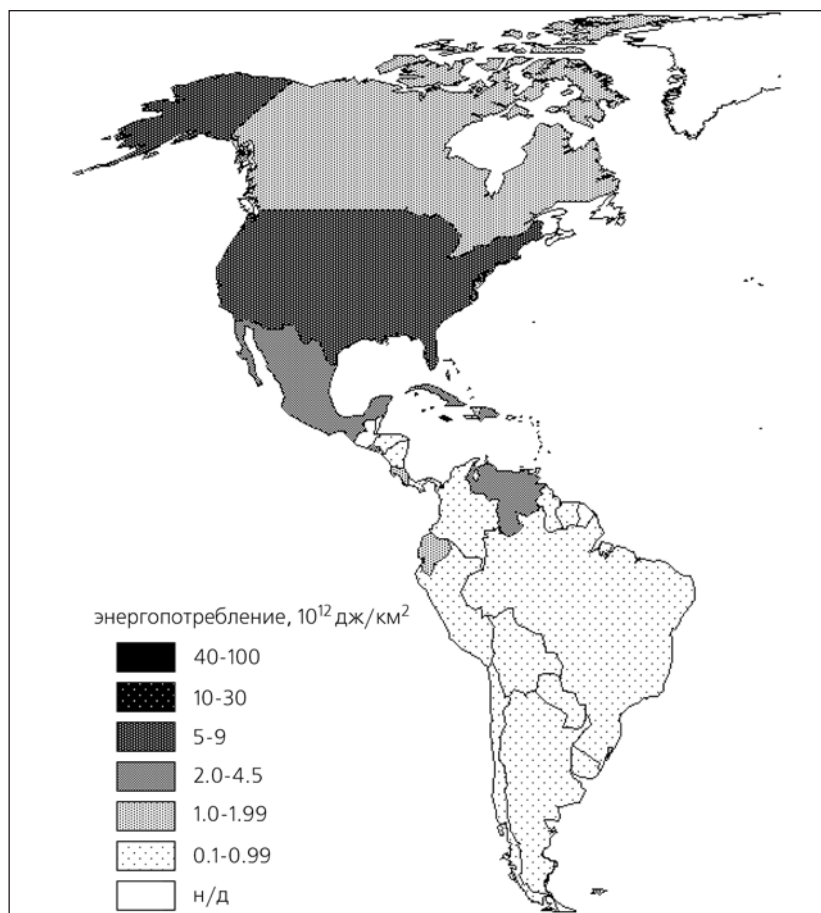
По масштабам автомобилизации, определяющей транспортное воздействие на среду, Россия, конечно, намного опережает Эфиопию (соответственно 122 и 1 личный автомобиль на 1000 жителей), но пока еще сильно отстает от уровня Германии, Италии, США (более 500 автомобилей) [7]. По причине промышленного и транспортного отставания даже на европейской части России поступление свинца на единицу площади близко к фоновому и на порядок ниже, чем в Западной Европе и Северной Америке [8].

Россия — единственная крупная лесопромышленная держава, в которой площади под лесами сегодня не уменьшаются, а растут. В мире масштабы лесовосстановления и лесосведения соотносятся как 1:10, а в нашей стране в 1999 г. это соотношение составляло 1.36:1, а в 1998 г. — даже 1.83:1 [9].

В то же время исследования показывают, что на единицу выпускаемой продукции в России расходуют значительно больше природных ресурсов и возникает больше производственных отходов, чем в развитых странах. Но их относительная «экологичность» во многом базируется на импорте ассимиляционного потенциала природной среды других стран, в частности России. Кроме того, при сравнениях нужно принимать в расчет и отмеченные выше географические особенности нашей страны (суровость климата, размеры территории и ее конфигурация).

Производственная нагрузка на единицу высокоосвоенной территории (плотность населения свыше 10 чел./км²) в странах Западной Европы, Японии, Корее превышает российскую в 30–40 раз.

Поскольку данные об экологической нагрузке соотносятся, как правило, с огромными масштабами нашей страны, они выглядят благополучными на общем фоне. Что касается крупных городов, то, судя по некоторым разрозненным



Энергопотребление на единицу территории по странам мира.

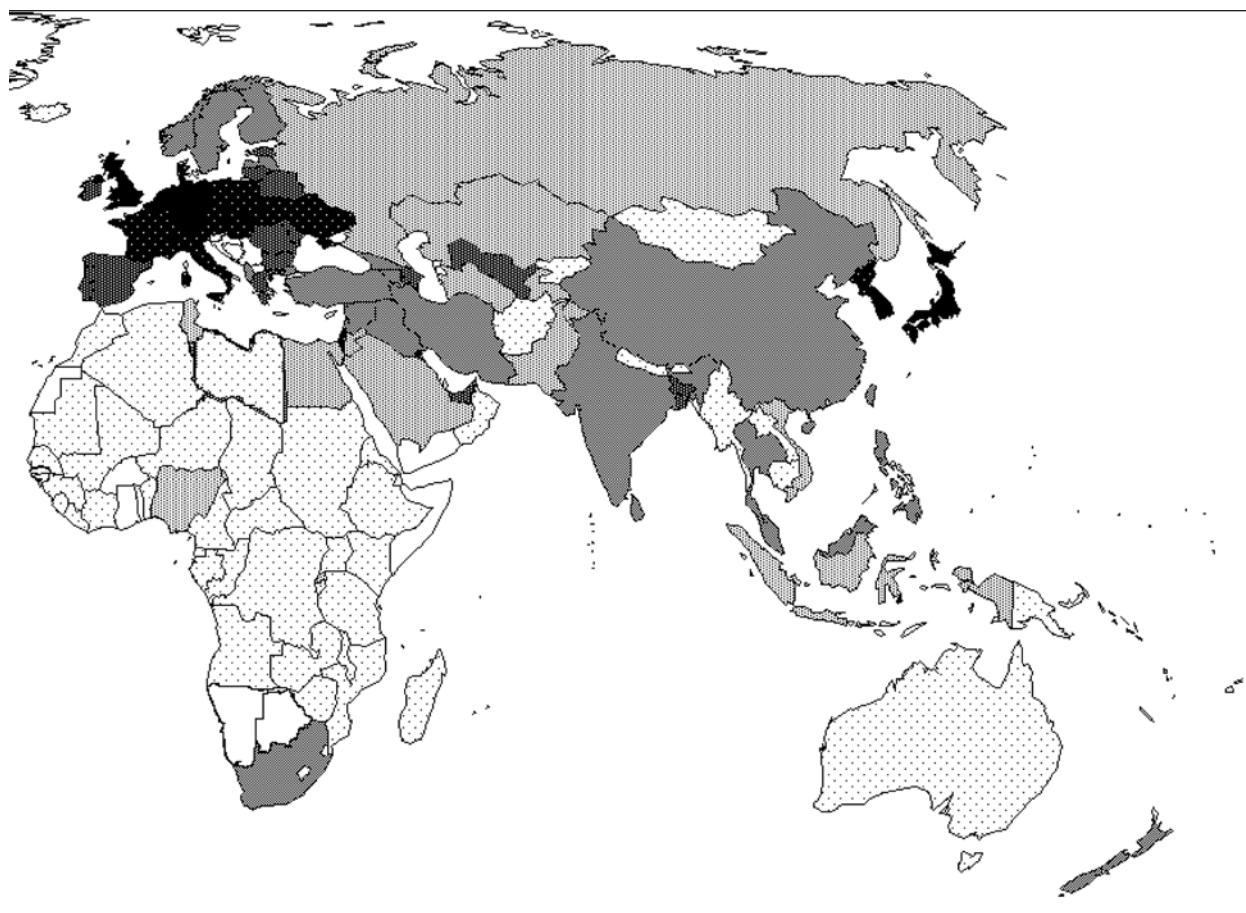
данным, уровни загрязнения среды в наших и зарубежных мегаполисах в целом сопоставимы. Однако в российских условиях заметно улучшают окружающие ландшафты, гораздо менее освоенные.

Нельзя при этом не признать, что в России немало источников потенциального риска. Это ядерное и химическое оружие, предприятия ВПК, трубопроводы, газохранилища, атомные и гидроэлектростанции, химические производства, авиация и т.п. Здесь сосредоточено около половины накопленного в мире обогащенного урана и примерно половина отходов ядерной индустрии. Россия несет ответственность за половину антропогенного «космического мусора». В нашей стране находятся очень крупные в мировом масштабе зоны радиоактивного загрязнения. Но в целом вклад российского

хозяйства в глобальную трансформацию природной среды не превышает долю страны в территориальных ресурсах Земли, в населении и в мировом хозяйстве.

Читатели «Природы» уже знакомы с ситуацией в Баренцевоморском регионе, к которой западные экологи, политики и СМИ проявляют повышенный интерес. В этом районе отечественные потенциальные экологические угрозы сочетаются с «импортируемыми» реальными опасностями. С Норвежско-Нордкапским течением сюда выносятся загрязнения из Северного моря, которое уже свыше 150 лет используется как крупномасштабная свалка отходов наиболее развитыми европейскими странами [10].

И все же позитивная экологическая роль России значительнее, чем ее вредное воздействие на



глобальные геоэкологические процессы. Этот факт дает основание считать российскую территорию крупнейшим районом стабилизации биосферы.

Опыт расчета экологического налога

Но вернемся к возможным платежам для стран за использование экологических ресурсов планеты. Очевидно, они должны быть прямо пропорциональны антропогенному давлению на среду и обратно пропорциональны ее устойчивости к воздействиям.

Для измерения антропогенного давления иногда используют потребление энергии на единицу территории. Однако, хорошо отражая ситуацию в развитых странах, этот показатель плохо работа-

ет в отсталых, где главные экологические процессы (уничтожение лесов, опустынивание, деградация почв) идут без существенного применения техники и, следовательно, без так называемой коммерческой энергии, которая фиксируется статистическим учетом.

Более универсален показатель общего энергопотребления, включающий производственную и физиологическую (используемую на питание человека) части. Он позволяет привести к общему знаменателю трудно сопоставимые параметры воздействия на среду в развитых странах (технологическое давление) и экономически отсталых (демографическую нагрузку).

На карте распределения этого показателя заметны зоны дестабилизации природной среды — это Западная Европа, Южная и Юго-

Восточная Азия, Северная Америка. При этом европейская зона высокой нагрузки распространяется до российских границ. По удельному энергопотреблению Юго-Западная (Передняя) Азия вполне сопоставима с югом и юго-востоком этой части света. В пределах обширных зон высокой нагрузки выделяются европейский и японо-корейский ареалы. В них нагрузки в 10 раз выше даже тех, которые наблюдаются в среднем на территории США, Китая и Индии. В России потребление энергии на единицу территории в 56 раз ниже, чем в Нидерландах.

Интегральный показатель устойчивости среды — естественная биологическая продуктивность ландшафтов. Ряд специалистов считают сохранение не нарушенной хозяйственной деятельностью биоты главным рычагом раз-

решения глобальной экологической проблемы [4]. Другие же полагают, что это не панацея от всех бед, поскольку девственная природа крайне неравномерно распределена по поверхности Земли [11]. Необходима ее консервация непременно должна сочетаться с реанимацией нарушенных ландшафтов, что предполагает широкое использование технических средств охраны среды — ресурсосбережения, совершенствования технологий, в том числе очистных, и т.п. Являясь важнейшей «очистной установкой» планеты, растительный покров воспроизводит кислород и поглощает углекислый газ.

Величина ежегодного прироста биологической продукции — важный индикатор интенсивности биологического круговорота. Ему соответствует и интенсивность самоочищения среды, ее способность перерабатывать антропогенные отходы. Кроме того, растительность — фактор влагооборота, источник питания почв, восполнения их плодородия. Развитый покров протривостоит не только антропогенным, но и есте-

ственным деструктивным воздействиям — солифлюкции, эрозии, дефляции, селям, лавинам. Формируя среду, биота одновременно служит важным ресурсом — основным источником пищи для человека.

Соотношение энергопотребления и биологической продуктивности ландшафтов характеризует «вещественно-энергетическую» составляющую природопользования. Но нужно определить еще и экологичность землепользования (отношение площади пашни к площади лесов), а также выделить естественность угодий — долю практически не освоенных, «диких» земель и охраняемых природных территорий. Эти два последних показателя в разных аспектах характеризуют степень сохранности первозданной биоты.

В итоге можно предложить такую формулу для определения экологического налога (N):

$$N = \frac{E_t + E_\phi}{S} \cdot \frac{S_n}{S_p} \cdot \frac{P_m}{P} \cdot (S - S_\lambda),$$

где E_t и E_ϕ — технологическое и физиологическое потребление

энергии; $E_\phi = K \cdot H$ (K — средняя калорийность питания населения, H — численность населения); S — площадь страны; S_n — площадь земель, занятых пашней; S_λ — площадь земель, занятых лесами; S_λ — площадь практически не освоенных, «диких» земель и охраняемых природных территорий; P и P_m — биологическая продуктивность естественных ландшафтов (средневзвешенная по стране — P и миру — P_m).

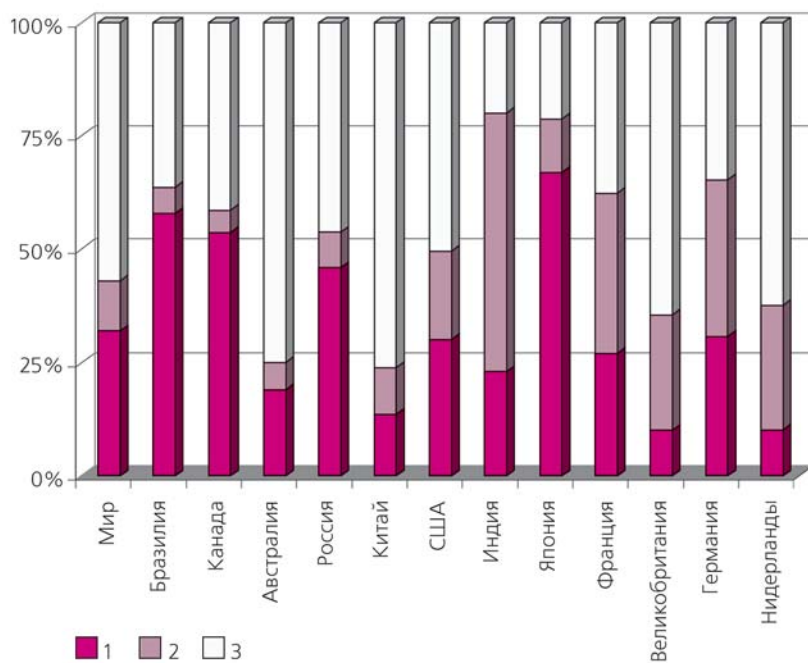
Рассчитанные для крупных стран величины условного налога представлены на рисунке на с.9. Заметим, что характеризуются все, кроме Индонезии, страны так называемой большой экологической восьмерки*, выделенной международными экспертами в конце XX в. [12].

По этим данным, Россия входит в число благополучных стран планеты, намного опережая демографических (Китай, Индия) и экономических (США) гигантов мира, а также ведущие европейские государства. Они, следовательно, выступают крупными «экологическими иждивенцами» России.

Проведенный анализ показывает, что при условии установления справедливого международного экологического порядка наша страна может рассчитывать на получение существенной ренты. Пока же России оказывается благотворительная помощь, отнюдь не адекватная ее значимости. Так, Международный банк реконструкции и развития предоставил средства на природоохранные проекты в 1997 г.: Китаю — 2 млрд долл., Индии и Мексике — по 1.4 млрд, Польше, Турции и Бразилии — по 0.8 млрд, России — 0.23 млрд [13].

При этом на приоритетные для Российской Федерации цели (охрану атмосферы, вод, утилизацию отходов, рекультивацию земель) шли лишь 16.2% выделенных средств, а основная часть — на оснащение контроля загрязнения среды приборами и расходными материалами.

* Россия, США, Япония, Германия, Китай, Индия, Индонезия, Бразилия.

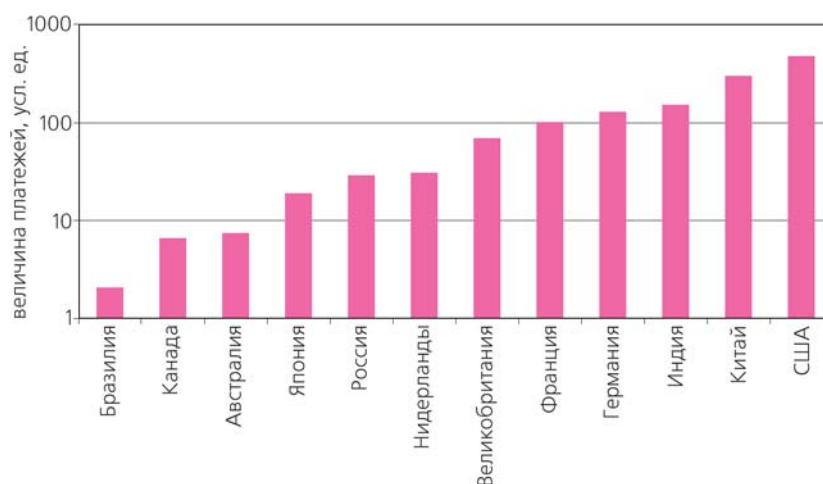


Доля лесов (1), пашен (2) и прочих земель (3) в отдельных странах.

Приведенный пример расчета величины экологического налога — конечно же, не единственный из возможных. Так, предложенный алгоритм не подходит для стран аридного пояса, обделенных лесами. Сознавая несовершенство предложенной формулы, заметим все же, что она отражает основные составляющие платежей за пользование ресурсами биосферы, хотя технология их расчета, разумеется, требует дальнейшего совершенствования.

Россия унаследовала ресурсоемкую экономику с перекошенной в сторону тяжелой индустрии структурой, определяющей высокий антропогенный пресс на природу. В ряде районов страны действительно сформировалась очень острая экологическая ситуация. За годы перестройки и реформ положение лишь обострилось вопреки расхожему представлению, что в условиях экономического спада позитивная экологическая роль нашей страны стала еще более значимой. Действительно, за эти годы снизился уровень реальных экологических угроз, но возросли угрозы потенциальные. В случае возникновения крупной техногенной катастрофы ликвидация ее последствий потребует огромных ресурсов, что может привести к разрывам в других звеньях технологических цепочек.

В условиях неуклонно стареющих инфраструктур, производ-



Оценка рентных платежей за использование ресурсов биосферы по отдельным странам.

ственного и природоохранного оборудования стихийная деиндустриализация страны представляет большую потенциальную экологическую опасность, чем дореформенная советская функционирующая индустрия. При этом главная угроза — не конструктивные особенности отечественной техносферы и даже не экологические террористы. Основная опасность кроется в российской гибридной экономике, вобравшей в себя худшие черты и рыночного, и планового хозяйства.

Однако важно понимать, что по широкому кругу параметров

Россия относится к числу экологически благополучных стран планеты, и этот фактор можно использовать для упрочения наших позиций в международных отношениях. Увы, Россия потеряла значительную часть своего влияния в военной, политической, экономической и других сферах. Нужно активнее использовать то, что осталось. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 02-06-80233) и Фонда Макартуров.

Литература

1. Круговорот углерода на территории России / Под ред. Г.А.Заварзина. М., 1999.
2. Природно-ресурсный комплекс РФ // Бюл. Использование и охрана природных ресурсов России. 2001. №1—2.
3. World Resources. 2000—2001. N.Y.; Oxford, 2000.
4. Лосев К.С. Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI в. М., 2001.
5. Россия: стратегия развития в XXI в. М., 1997.
6. Вахирев.Р.И. Состояние и тенденции развития предпринимательства в России // Цивилиз. бизнес как фактор устойчивого развития России. М., 1999. С.8—19.
7. Statistical Yearbook. N.Y., 1997.
8. Глазовская М.А. Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенному воздействию. М., 1997.
9. Российский статистический ежегодник. М., 2000.
10. Клюев Н.Н. Экологическая безопасность России: внешние угрозы // Природа. 2002. №11. С.3—10.
11. Виноградов М.Е. и др. // Вестн. РАН. 1994. Т.64. №9. С.810—817.
12. Brown L.R. et al. State of the World. 1997. N.Y.; L., 1997.
13. О состоянии окружающей природной среды РФ в 1997 // Зеленый мир. 1998. №21.

История науки

«Карта Винланда» все же фальшивка

Знаменитая «Карта Винланда»¹ была обнаружена в одной из частных библиотек в 1957 г. Она весьма правдоподобно изображает очертания берегов Северной Америки, включая о. Ньюфаундленд и часть Атлантического побережья Канады. Многие годы карта вызывает горячие споры специалистов: по мнению многих, она относится к середине или даже первой трети XV в., т.е. составлена задолго до плавания Колумба.

Американские исследователи — физик Д.Донахью (D. Donahue; Аризонский университет в Тусоне), химик Ж.Олин (J. Olin; Смитсоновский центр материаловедения в Сьютленде) и физико-химик Г.Харботтл (G. Harbottle; Брукхейвенская национальная лаборатория в Аптоне) — датировали по содержанию ¹⁴C пергамент, на котором изображена карта. Оказалось, что этот материал действительно изготовлен между 1423 и 1445 г. О том же свидетельствуют и некоторые характерные особенности, имеющиеся как у карты, так и у протоколов Базельского собора (1431–1449) католической церкви.

И все же «Карта Винланда» — фальшивка. К такому выводу пришли британские ученые К.Браун и Р.Кларк (K. Brown, R. Clark; Лондонский университетский колледж), проведя химическое и оптическое исследование чернил, которыми она выполнена. Черные линии, подходя к краю листа, выцветают, приобретая желтоватый оттенок. Это казалось вполне правдоподобным, но, изучив харак-

¹ Винландом (Страной винограда) норманны называли северо-восточное побережье Северной Америки; см. также: *Эрдели И.* Карта XVI века открывает Америку XI века // *Природа*. 1977. №5. С.90–95; *Гумилев Л.Н.* Викинги не солгали // Там же. С.95–99.

тер лазерного луча, отражаемого линиями, исследователи обнаружили, что желтые участки содержат анатазу — вещество, весьма редко встречающееся в природной среде, но широко применявшееся в производстве чернил и красок начиная с 1920-х годов. Таким образом, выцветание и пожелтение сознательно подделаны. (Интересно, что подлинные старинные чернила, состав которых основан на углероде, не выцветали. Но фальшивокартограф, очевидно, этого просто не знал.)

Итак, в многолетнем споре поставлена последняя точка.

Science. 2002. V.297. №5583. P.931 (США).

Океанология. Геология

Ноев ковчег отменяется?

Несколько лет назад американские геологи Б.Райан и У.Питман (B. Ryan, W. Pitman; Обсерватория Ламонта и Доррти по изучению Земли при Колумбийском университете) предложили гипотезу, согласно которой примерно 7500 лет назад в Черное море внезапно вторглись огромные массы вод Средиземного моря. (Не исключено, что библейские легенды о Ноевом ковчеге основывались именно на этих катастрофических событиях.) Многие океанологи и геологи отнеслись к гипотезе вполне серьезно.

Райан и Питман описывали явления так. Около 18 тыс. лет назад, во время последнего ледникового периода, значительная часть влаги аккумулировалась в ледниках. Уровень Мирового океана понизился, и Черное море, потеряв с ним связь, превратилось в пресноводное озеро, питаемое лишь реками. Затем на Земле потеплело, многие ледники растаяли, уровень морей поднялся,

и средиземноморская вода гигантским водопадом прорвалась в Черное море, вновь сделав его соленым. Важное свидетельство тому — внезапное появление остатков соленоводных видов моллюсков, которые обнаружены в осадках Черного моря, отложившихся 7500 лет назад.

Однако по мнению канадских геологов во главе с А.Аксу (A. Aksu), никакого «потопа», внезапно изменившего судьбу Черноморья, вообще не было. Сейсмическая съемка Мраморного моря и анализ его донных отложений показывают, что 10 тыс. лет назад здесь существовала дельта реки. Примерно 9 тыс. лет назад она обратилась вспять. В Черное море стали проникать соленые воды, постепенно увеличивая в нем концентрацию солей. Таким образом, появление соленоводных моллюсков вовсе не требовало внезапного наводнения.

Однако Райан считает, что с этих позиций невозможно объяснить, почему осадочные слои, залегающие ныне на глубине 120 м под поверхностью Черного моря, соответствуют слоям, характерным для побережий возрастом около 9 тыс. лет. По его мнению, море тогда было весьма мелким, а его берега располагались как раз на этой значительной глубине.

Столкновение противоречащих точек зрения вызвало среди специалистов широкую дискуссию.

Science. 2002. V.296. №5577. P.2331 (США).

Охрана природы

Волки Франции

По современным оценкам, численность волков в странах Европы¹ составляет: около 2500 особей в Испании, 500–1000 в Италии, 350 в Португалии,

¹ См. также: Волк вернулся // *Природа*. 2002. №7. С.86.

100—200 в странах Скандинавии, 100—150 в Хорватии, 700—900 в Польше, а во Франции — всего 30 особей.

Столь низкая численность волка в этой стране, как считают эксперты специально созданной Национальной ассамблеи комиссии, связана с традиционно негативным отношением к этому хищнику местных пастухов, которые считают его главным виновником гибели овец. Однако, по данным Всемирного фонда охраны дикой природы, мелкий рогатый скот гораздо чаще гибнет от бруцеллеза и нападений бродячих собак, чем от волков.

Sciences et Avenir. 2002. №670. P.19 (Франция).

Космические исследования

Венера снова в повестке дня

В мае 2002 г. руководство Европейского космического агентства (ESA) решило отменить намечавшийся на 2005 г. запуск аппарата «Venus Express» к Венере. Причина — финансовые трудности (в частности, отказ Италии внести обещанные 8,5 млн долл.), а также отставание работ относительно графика. Однако в ноябре 2002 г. ESA вновь вернулось к прежнему плану под давлением научной общественности и в надежде, что Италия исполнит взятые на себя обязательства; решено ограничить вклад этой страны лишь поставкой запасных частей к приборам, уже изготовленным ее специалистами. Общая стоимость проекта и запуску 160 млн долл.

«Venus Express» между 2005 и 2009 г. окажется единственным аппаратом, направленным землянами к этой соседней, но одной из наименее изучен-

ных планет Солнечной системы. Лишь в 2009 г. туда же планируется запустить японский космический зонд «Planet C». Science. 2002. V.298. №5597. P.1315 (США).

Зоология

Летающие змеи

Известно, что ядовитые пресмыкающиеся из рода украшенных древесных змей (*Chrysorelea*), обитающие в тропических лесах Южной и Юго-Восточной Азии, способны совершать планирующие полеты дальностью до 100 м. (Кстати, по-английски они так и называются: flying tree snakes — летающие древесные змеи.)

Дж.Соша (J.Socha; Чикагский университет, США) заснял полет одной из них, райской украшенной змеи (*Cb.paradisi*), и изучил его кинематику. Рептилия длиной 1 м уцепилась концом хвоста за ветку; затем, повиснув на ней, приняла форму буквы J и с силой оттолкнулась. В парении змея распластала тело, производя при этом непрерывные волнообразные движения. Такой способ позволяет не только планировать на весьма большие расстояния, но и изменять направление полета.

Sciences et Avenir. 2002. №667. P.44 (Франция).

Океанология

Подводный вулкан Моноваи

В южной части Тихого океана, примерно на полпути между островами Кермадек и Тонга, находится подводная гора Моноваи. Ее вершина лишь на 100 м не достигает поверхности моря. Начиная с 1977 г. акустическая сеть регистрировала пре-

рывистые мощные звуки; на водной поверхности стали появляться цветные пятна и поднимавшиеся из глубины пузыри, что сопровождалось глухим ревом. Не оставалось сомнений, что гора Моноваи — действующий вулкан. Он образует вулканический центр подводного хребта Тонга—Кермадек.

В конце 2002 г. сейсмическая сеть Французской Полинезии зарегистрировала мощные волны, вызванные, видимо, сильными взрывами в недрах вулкана, продолжавшимися в течение примерно 2 ч. Они прекратились столь же внезапно, как и начались. Французские и новозеландские ученые продолжают наблюдения.

Bulletin of the Global Volcanism Network. 2002. V.27. №5. P.7 (США).

Экология

Лоси и алкоголь

Комитет по наблюдению за дикими животными, обитающими на высоком плоскогорье Телемарк (юг Норвегии), обратился к жителям этой части страны с призывом соблюдать осторожность при встрече с лосями. Основанием послужили участвовавшие случаи агрессивного поведения лосей в лесах и садах. Причиной необычного поведения животных стал снег, выпавший в конце лета 2002 г.: висевшие на ветках плоды забродили и превратились в хмельное зелье, а для многочисленного стада лосей Телемарка несобранные ягоды — их традиционная пища. Оказалось, что как на людей, так и на лосей алкоголь действует по-разному: одни становятся вялыми и апатичными, другие — агрессивными.

Sciences et Avenir. 2003. №671. P.23 (Франция).

Скорость размножения и угроза вымирания вида

Л.В.Полищук

В наши дни скорость вымирания видов на два-три порядка выше той, что была до палеолита [1]. Только с начала XVII в. из примерно 4 тыс. видов млекопитающих по крайней мере 63 — уже нет. Среди наиболее известных потерь отечественной фауны — предок европейского крупного рогатого скота тур (*Bos primigenius*), родоначальник домашней лошади тарпан (*Equus gmelini*), стеллерова корова (*Hydrodamalis gigas*), которая была истреблена человеком спустя всего 27 лет после ее открытия. Однако причины вымирания растений и животных не всегда столь очевидны. В современном мире это нередко происходит в результате сокращения пригодных местообитаний, а также вселения хищников или паразитов, которым аборигенные виды не могут противостоять.

В середине XX в. Международный союз охраны природы и природных ресурсов (МСОП) начал сбор информации о редких и находящихся под угрозой исчезновения видах, что привело в дальнейшем к созданию Красных книг. Критерии включения вида в «красные списки», как теперь их еще называют, со временем совершенствовались и детализировались, но основными



Леонард Владимирович Полищук, кандидат биологических наук, научный сотрудник кафедры общей экологии биологического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — популяционная экология и демография. Автор двух книг — «Динамические характеристики популяций планктонных животных» (М., 1986) и «Количественные методы оценки основных популяционных показателей: статический и динамический аспекты» (М., 1989, в соавторстве с А.В.Смуровым).

были и остаются: значительное сокращение численности и/или ареала вида (теперь обычно считается, что на протяжении не менее трех поколений) или же его редкость (низкая общая численность, узкий ареал). Однако, как бы тщательно ни собирались эти сведения и какими квалифицированными ни были специалисты, занимающиеся этим делом, избавиться от субъективности при формировании «красно-книжных» списков очень трудно [2]. Поэтому для решения, какой вид действительно нуждается в повышенном внимании, важно найти некие дополнительные критерии, основанные на строго измеряемых характеристиках

вида, по которым можно было бы судить о его уязвимости. Именно это я и попытался сделать — оценить уязвимость вида, используя в качестве материала данные по демографии и массе тела млекопитающих [3, 4].

Вероятность вымирания и задача о разорении игрока

Вымирание грозит, по-видимому, в основном медленно размножающимся видам. Наглядные тому примеры — стеллерова корова, производившая на свет лишь одного детеныша раз в два года, или птица додо (*Raphus*

cucullatus) из семейства дронтовых, в кладке которой было только одно яйцо. В исчезновении таких видов принято винить человека, и это, конечно, верно, но ведь зайцев тоже истребляли, тем не менее им, как и другим видам из отряда зайцеобразных (кроликам, пищухам), вымирание не грозит. Более того, это единственный отряд из фауны млекопитающих России и сопредельных регионов, ни один представитель которого не внесен в Красную книгу, несмотря на то, что зайцы всегда были излюбленным объектом охоты, а ареал кроликов занимает совсем небольшое пространство на юге Украины и в Молдавии. В чем же тут дело? Их, скорее всего, спасает баснословная, вошедшая в поговорку скорость размножения. Связь между вероятностью вымирания вида и скоростью его размножения можно установить, обратившись к известной из теории вероятностей задаче о разорении игрока [5].

По условию задачи, игра, в которой один из участников ставит на кон z рублей (чтобы задача не выглядела слишком искусственной, допустим, что в другой раз второй игрок поставит эту же сумму), состоит в проведении ряда испытаний, причем для владельца начального капитала вероятность выиграть рубль и добавить его к имеющейся сумме при каждом испытании равна p , а проиграть рубль — q ($p > q$, в противном случае проигрыш практически гарантирован). Для выигрыша надо накопить сумму, много большую начального капитала; проигрыш — это потеря z рублей, т.е. разорение. Какова же вероятность разорения (P)? Решение задачи: $P = (p/q)^{-z}$.

Математически процесс вымирания особей можно описать точно так же, как потерю денег, только вместо вероятности выигрыша p фигурирует величина, пропорциональная удельной (в расчете на особь) рождаемости b , вместо вероятности проигрыша q — величина, пропорци-

ональная удельной смертности d , а роль начального капитала играет число особей n , с которым ассоциируется вероятность вымирания. В итоге вероятность вымирания вида (популяции) описывается следующей моделью: $P = (b/d)^{-n}$, а соответствующую теорию можно назвать демографической теорией вымирания [6].

Биологическая интерпретация модели вымирания, основанной на задаче о разорении игрока, очень проста. Поскольку отношение b/d — это количество потомков, которое самка производит за время жизни (так как $1/d$ — это средняя продолжительность жизни), модель показывает, что вероятность вымирания тем меньше, чем больше скорость размножения. Это вполне согласуется с общепринятыми представлениями экологов. Однако использовать эту модель в качестве количественной теории довольно сложно. Во-первых, ее невозможно «параметризовать», т.е. оценить значение n , поскольку в нашем распоряжении нет независимых оценок P . Во-вторых, по этой же причине ее трудно верифицировать, т.е. сделать прогноз вероятности вымирания и сравнить его с реальностью. Наконец, как и большинство математических построений, опирающихся не столько на конкретные биологические знания, сколько на здравый смысл, модель представляет собой слишком жесткую конструкцию для описания реальности. Так, в ней не учитывается возможная связь вероятности вымирания с другими характеристиками вида, например, с массой тела. Между тем на этой зависимости основан известный закон увеличения размеров организмов в филогенетической ветви (или так называемое правило Денпери), согласно которому «по мере хода геологического времени выживающие формы увеличивают свои размеры (а следовательно, вес) и затем вымирают» (В.И.Вернадский). Вполне может быть, что и другие показа-

тели связаны с вероятностью вымирания несколько не хуже, чем отношение b/d . Модель, претендующая на описание реальности, должна быть гибкой, и самое главное для ее построения необходимы количественные оценки вероятности вымирания или какого-либо иного показателя уязвимости вида.

Красная книга и скорость размножения

В большинстве случаев реально оценить вероятность вымирания невозможно, к тому же она может оказаться столь высокой (например, при очень низкой численности), что уже поздно принимать меры по спасению вида. Поэтому гораздо важнее оценить перспективы вида, т.е. вероятность *угрозы* его вымирания. Как известно, виды, которым уже реально угрожает вымирание, занесены в списки Красной книги. Учитывая эту информацию, можно попробовать оценить вероятность угрозы вымирания (иными словами — вероятность стать кандидатом в Красную книгу) и для любого другого вида. Такие оценки могут быть полезны как для развития теории, так и для практики, поскольку позволяют заранее, до наступления реальной опасности, выявлять виды, нуждающиеся в защите.

В качестве объекта были взяты млекопитающие — одна из наиболее хорошо изученных групп животных. Общей сводки по демографии млекопитающих обнаружить не удалось, поэтому из многочисленных, в основном отечественных, публикаций (использовано более 130 литературных источников) были собраны сведения о 90 видах, т.е. примерно 30% от всех млекопитающих фауны бывшего СССР. «Краснокнижными» в нашей выборке оказались 25 видов, или 28%, притом что во всей фауне их доля составляет примерно 25% (примерно из 300 видов

млекопитающих СССР в «Красной книге СССР» представлено 77, не считая подвидов) [7].

Для каждого выбранного вида были найдены четыре демографические характеристики: средние величины плодовитости за год и за время жизни (выраженные в количестве дочерей, производимых самкой за год и за среднее время жизни взрослых особей соответственно), число дочерей в помете и средняя продолжительность жизни взрослых особей (т.е. после достижения половой зрелости). Помимо этого был использован еще один признак — средняя масса тела взрослых самок.

Дабы не вызывать лишних вопросов у читателя, сразу оговорюсь: принимались во внимание только те характеристики, которые были получены в дикой природе, а не в условиях зоопарка или вивария. То, что в расчетах учитывалось лишь число самок, — дань установившейся в демографии традиции (число самок получалось из общего числа детенышей делением пополам). Кроме того, замечу, что использованные демографические характеристики относятся к виду в целом, а в Красной книге многие виды представлены на уровне отдельных географических подвидов; однако, как показала специальная проверка, характеристики «краснокнижных» подвидов вполне согласуются с усредненными видовыми показателями.

Все 90 видов были расположены в порядке убывания значений по каждому из пяти изученных признаков, и достаточно было простого просмотра списков, чтобы заметить в них крайне неравномерное распределение «краснокнижных» видов [3]. Из-за недостатка места невозможно привести здесь данные для всех 90 видов по всем признакам, ограничимся для примера лишь одним из них — плодовитостью за время жизни. Разобьем упорядоченный по этому признаку список на девять групп по 10 видов и посмотрим,

Таблица 1

Десять видов млекопитающих с самой высокой (1–10) и самой низкой (81–90) плодовитостью за время жизни (выражена в числе дочерей). Цветом выделены виды, внесенные в «Красную книгу СССР».

Вид	Плодовитость
1. Заяц-беляк (<i>Lepus timidus</i>)	15.2
2. Кролик (<i>Oryctolagus cuniculus</i>)	13.7
3. Степной хорек (<i>Mustela eversmanni</i>)	13.0
4. Заяц-русак (<i>Lepus europaeus</i>)	11.4
5. Горноста́й (<i>Mustela erminea</i>)	9.3
6. Красная пищуха (<i>Ochotona rutila</i>)	8.8
7. Рыжеватая пищуха (<i>Ochotona rufescens</i>)	8.7
8. Черный хорек (<i>Mustela putorius</i>)	8.3
9. Большеухая пищуха (<i>Ochotona macrotis</i>)	7.8
10. Обыкновенная белка (<i>Sciurus vulgaris</i>)	7.8
81. Сайга (<i>Saiga tatarica</i>)	1.6
82. Выхухоль (<i>Desmana moschata</i>)	1.5
83. Бородатый козел (<i>Capra aegagrus</i>)	1.5
84. Выдра (<i>Lutra lutra</i>)	1.4
85. Росомаха (<i>Gulo gulo</i>)	1.4
86. Морж (<i>Odobenus rosmarus</i>)	1.3
87. Горный баран (<i>Ovis ammon</i>)	1.2
88. Зубр (<i>Bison bonasus</i>)	1.2
89. Кабарга (<i>Moschus moschiferus</i>)	1.1
90. Калан (<i>Enhydra lutris</i>)	1.0

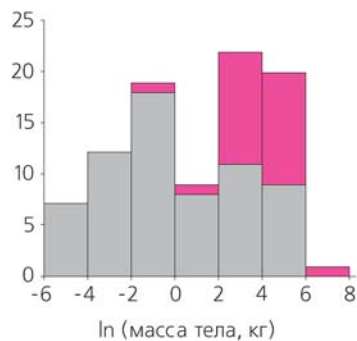
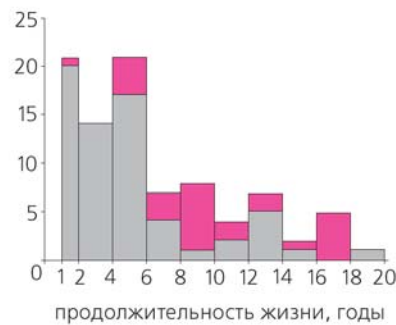
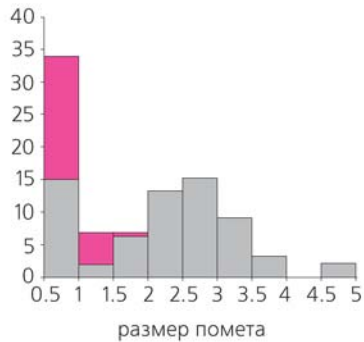
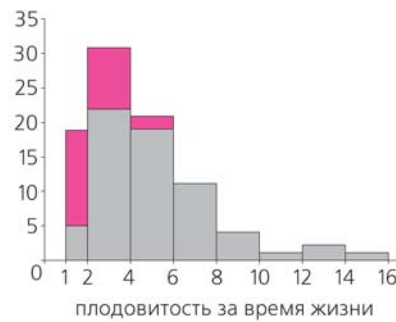
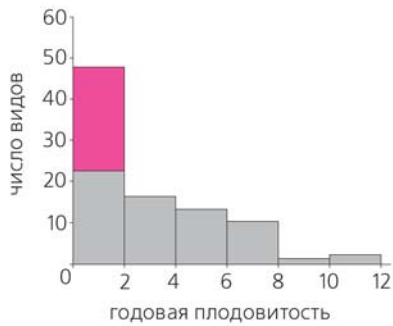
Примечание. Полностью таблица опубликована в «Журнале общей биологии» (2002. Т.63. №2. С.99–111).

сколько в каждой из них охраняемых. Среди наиболее плодовитых видов нет ни одного «краснокнижного», а среди наименее — их восемь (табл.1). Более того, по мере убывания плодовитости количество таких видов в группах закономерно возрастает или остается тем же, но никогда не уменьшается. Столь статистически не случайное распределение охраняемых видов наблюдается при рассмотрении всех изученных признаков: в Красную книгу попадают, как правило, крупные и долгоживущие млекопитающие, с небольшим числом детенышей в помете и низкой скоростью размножения. Так, годовая плодовитость «краснокнижных» видов в среднем более чем в шесть раз ниже, чем неохранных (0.56±0.07 против 3.56±0.34 дочерей в год соответственно), а их плодовитость за время жизни ниже более чем в два раза (2.20±0.19 против 5.02±0.37 дочерей за жизнь).

Полученные результаты находятся в явном соответствии с теорией вымирания, согласно которой большему риску вымирания подвержены медленно, а не быстро размножающиеся виды [6, 8]. Это значит, что вероятность оказаться под угрозой вымирания, или вероятность попадания вида в Красную книгу, — столь же объективный показатель уязвимости вида, как и более традиционная, но труднее определяемая практически, вероятность вымирания.

Вероятность попадания в Красную книгу и логистическая регрессия

Примерно оценить вероятность попадания в Красную книгу можно непосредственно по таблице, в которой виды упорядочены по определенному признаку. Так, если среди десяти наименее плодовитых видов во-



Распределение краснокнижных (выделено цветом) и некраснокнижных видов млекопитающих фауны бывшего Советского Союза по плодовитости за год и за время жизни, размеру помета (эти три признака выражены в числе дочерей), продолжительности жизни взрослых особей и массе тела.

семь находятся в Красной книге, то для всех видов с плодовитостью из этого диапазона вероятность оказаться там равна примерно 0.8. Однако такая оценка не вполне нас удовлетворяет хотя бы потому, что ранжирование видов не всегда можно провести однозначно (поскольку разные виды могут иметь одинаковое значение признака), да и сам список можно разбить на группы многими разными способами.

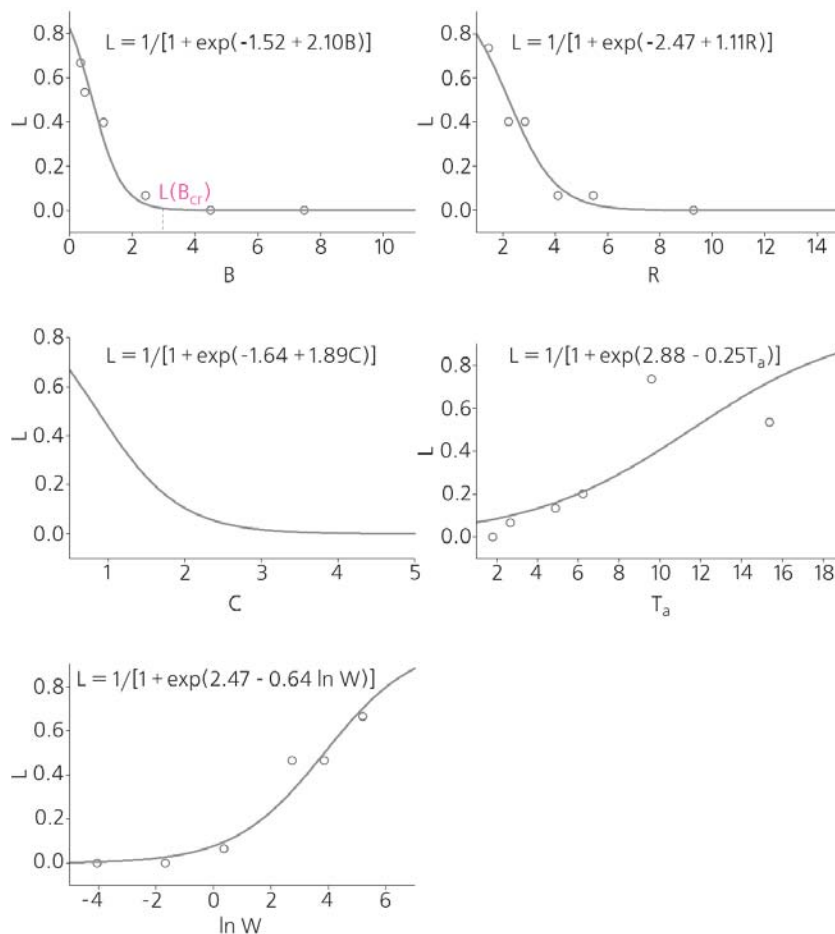
Попробуем рассуждать иначе. Допустим, нас интересует судьба некоего вида, биология которого хорошо изучена — известны скорость размножения, продолжительность жизни и т.д. Естественно, он находится под влиянием факторов среды, в том числе и тех, которые могут угрожать его существованию. Бу-

дущее вида может сложиться двойко: его численность, несмотря на воздействие неблагоприятных факторов, может оставаться стабильной или даже расти (например, благодаря высокой рождаемости), а может от поколения к поколению сокращаться, что в результате будет замечено, и вид окажется на страницах Красной книги. На математическом языке это можно описать так: изначально вид имел определенную вероятность попасть в Красную книгу, а то, что произошло с ним в итоге, — единичная реализация вероятностного процесса. Задача состоит в том, чтобы эту вероятность найти. Классическое частотное определение вероятности, как, например, при бросании монеты, применить в данном

случае нельзя просто потому, что не бывает одинаковых видов и в реальности наш мысленный эксперимент нельзя повторить. Но ведь каждый вид характеризуется определенным признаком (и даже не одним, а несколькими), который может быть связан с интересующей нас вероятностью монотонной зависимостью; к тому же, как мы помним, в нашем распоряжении множество (выборка) видов. Попробуем определить вероятность не непосредственно, а по ее зависимости от имеющихся признаков. Для этого необходима достаточно универсальная (т.е. пригодная для описания как почти линейной, так и крайне нелинейной связи), заключенная между 0 и 1 (поскольку это вероятность), монотонная функция. Этим требованиям отвечает логистическая функция (кстати, эта функция широко известна в экологии: она описывает логистический рост популяции), параметры которой находят с помощью регрессии двойичной переменной (в нашем случае это — присутствие (1) или отсутствие (0) вида в Красной книге) по непрерывной переменной — годовой плодовитости, массе тела и другим признакам, или по их совокупности (множественная регрессия).

Описанный подход был использован для построения зависимостей вероятности попадания вида в Красную книгу от каждого из рассматриваемых демографических признаков и массы тела по выборке из 90 видов. Качественно результат не отличался от полученного ранее при простом ранжировании видов: более высокую вероятность попасть в Красную книгу имеют крупные и медленно размножающиеся виды. Теперь, однако, в наших руках оказалась количественная модель (регрессионная зависимость), позволяющая прогнозировать интересующую нас вероятность.

Следующий шаг статистического анализа — построение зависимости вероятности от ком-



Вероятность попадания вида в Красную книгу (L), построенная по логистической регрессии, в зависимости от плодовитости за год (B) и за время жизни (R), размера помета (C), продолжительности жизни взрослых особей (T_a) и массы тела (W). Уравнения и соответствующие им кривые построены по всему массиву данных (т.е. по 90 точкам, каждая из которых соответствует отдельному виду). На четырех графиках из пяти нанесены точки, соответствующие эмпирической частоте попадания в Красную книгу, которая получается при разбиении упорядоченного по данному признаку набора из 90 видов на определенное число групп (здесь на 6 по 15 видов в каждой) и подсчете доли краснокнижных видов в каждой группе. Упорядоченный ряд нельзя построить только для размера помета, поскольку у многих видов размер помета одинаков. На графике зависимости от годовой плодовитости показана пороговая плодовитость $B_{cr} = 2.9$ дочерей/год, соответствующая вероятности попасть в Красную книгу $L(B_{cr}) = 0.01$.

бинаций признаков (множественных регрессионных моделей) — не привел к существенному улучшению качества модели. И это понятно, ведь все признаки взаимосвязаны: например, особи мелких видов живут недолго и, как правило, размножаются с большой скоростью.

Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только однофакторные модели. Но прежде чем перейти к детальному изучению полученных зависимостей, стоит определить, какая из них точнее соответствует реальности, и именно ей уделить основное внимание.

По каждой зависимости рассчитали вероятность попадания в Красную книгу для каждого конкретного вида, исходя из значения характеризующего его признака. Если эта вероятность была больше 0.5, то полагали, что вид находится под угрозой и должен присутствовать в Красной книге, если меньше — что нет. Результат такой обратной классификации сравнивали с реальностью, т.е. присутствует или отсутствует данный вид в Красной книге. Проведя сравнение по всем 90 видам, получали таблицу сопряженности 2×2 , в двух клетках которой указано число правильно классифицированных видов, а в двух других — неправильно. Произведение чисел, стоящих в двух первых клетках, деленное на произведение чисел в двух последних, называется в теории логистической регрессии отношением шансов. Среднее соотношение между числом правильных («успех») и неправильных («неудача») классификаций находили как корень квадратный из отношения шансов. Оказалось, что наилучшее отношение «успехов» к «неудачам» обеспечивают два признака — плодовитость за год и за время жизни. Именно эти признаки непосредственно связаны со скоростью размножения. Поскольку точно определить продолжительность жизни взрослых особей в природе довольно сложно, наибольшую практическую ценность представляет вероятность, рассчитанная по годовой плодовитости.

Вероятность попадания вида в Красную книгу находится в нелинейной зависимости от годовой плодовитости, причем эта зависимость имеет протяженное, практически горизонтальное плато в области нулевых значений вероятности. Так, при увеличении плодовитости до 2.9 дочерей в год вероятность попадания вида в Красную книгу уменьшается до 0.01, а для еще более быстро размножающихся видов становится почти нулевой. Если пренебречь

столь малыми величинами, то указанное значение годовой плодовитости можно считать пороговым. (Видов с годовой плодовитостью больше 2.9 в нашей выборке из 90 оказалось 30, что совсем немало.) Подчеркнем еще, что принятое пороговое значение не является артефактом модели, так как в выборке действительно нет ни одного «краснокнижного» вида с годовой плодовитостью больше 1.75 дочерей (эта величина характеризует выхухоль). Таким образом, 2.9 дочерей в год — пороговая плодовитость с определенным «запасом прочности».

Для области высоких значений вероятности характерно то, что даже при самой низкой плодовитости вероятность попадания вида в Красную книгу равна 0.8, а отнюдь не 1. Это значит, что в выборке нет ни одного вида, безусловно обреченного на такое сокращение численности, которое чревато вымиранием.

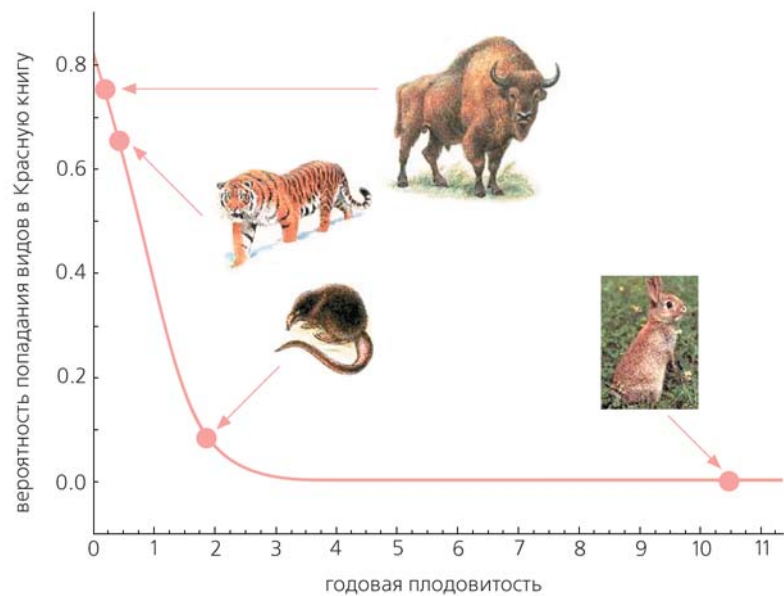
Понятно, что этот оптимистичный прогноз верен только при сохранении существующих условий. Любой вид можно довести до гибели, если приложить к этому специальные усилия или в случае глобальной катастрофы. Тем не менее даже с этой оговоркой прогноз, основанный на скорости размножения, дает определенное представление о том, какие виды более, а какие менее подвержены риску вымирания. Чем быстрее размножается вид, тем, как правило, труднее снизить его численность до такой степени, чтобы поставить его существование под угрозу.

Какие виды нуждаются в охране в первую очередь

Вероятность попадания вида в Красную книгу опирается лишь на «внутренние» характеристики вида (такие как средние, типичные для него годовая плодовитость, размер помета и т.д.) и не учитывает внешние



Сравнительная пригодность разных признаков для оценки вероятности попасть в Красную книгу, исходя из правильной («успех») или неправильной («неудача») обратной классификации видов на красные и некреснокнижные. Буквенные обозначения признаков те же, что и на предыдущем рисунке.



Положение некоторых видов на кривой вероятности попадания в Красную книгу, построенной на основе годовой плодовитости. Зубр, тигр и русская выхухоль находятся в Красной книге. В качестве примера вида, которого нет в Красной книге, показан кролик.

условия, которые между тем постоянно меняются и влияют на эти характеристики. Тем не менее такой подход может весьма эффективно описывать реальность. Вопрос только в том, к какой реальности он приложим, вернее, каковы границы его применимости.

Наш подход относится к сфере макроэкологии (термин предложен Дж.Брауном и Б.Маурером в 1989 г. [9]). Эта часть экологии изучает явления, происходящие на больших пространствах, когда биологические, в частности демографические, свойства видов выходят на пер-

вый план, а изменчивость среды, доставляющая в других ситуациях массу неприятностей экологами, отстывает на второй. На языке вероятностной теории вымирания это означает, что в макромасштабе основное значение имеет демографическая стохастичность и гораздо меньшее — средовая. Почему так происходит? Демографическая стохастичность зависит от скорости роста численности (именно с ней мы имеем дело в этой работе). Средовую стохастичность можно описать так: в последовательные отрезки времени среда становится то лучше, то хуже, и, если эти отклонения велики, на каком-то отрезке среда может стать совсем неблагоприятной, что приведет к вымиранию вида. Говоря формально, средовая стохастичность зависит от дисперсии скорости роста численности. Если дисперсия велика, то даже при большой скорости роста вероятность вымирания все равно велика. Однако на большом пространстве эта дисперсия стремится к нулю, потому что обычно отдельные локальные популяции в разных точках пространства могут испытывать противоположно направленные средовые воздействия, взаимно уравнивающие друг друга. Здесь работает закон больших чисел, где «большое число» —

количество удаленных друг от друга, а потому почти независимых популяций. Таким образом, на большом пространстве эффект средовой неопределенности относительно невелик. Однако при обычном, среднем уровне численности эффект демографической стохастичности также невелик, поскольку он проявляется только в случае низкой численности.

Иная ситуация складывается в случае, когда из-за неумеренного промысла или природных катаклизмов (неурожая кормов, эпизоотии, холодной или многоснежной зимы и т.д.) численность всех локальных популяций и вида в целом одновременно сокращается. Такие катастрофы довольно редки, однако теоретически любой вид может оказаться в подобной ситуации. Тогда, по-видимому, и решается, кому суждено погибнуть или в лучшем случае попасть в Красную книгу, а кому — нет. В периоды низкой численности эффект средовой стохастичности на большой территории по-прежнему невелик, и судьба вида оказывается полностью зависимой от демографической стохастичности. Виды с высокой рождаемостью (самки которых, по нашей оценке, приносят более 2.9 дочерей в год) быстро возвращаются к прежнему, нормальному уровню численности,

им вымирание, как правило, не грозит. Напротив, медленно размножающиеся виды задерживаются в состоянии низкой численности на длительное время, поскольку им труднее компенсировать последствия, например увеличения промысла.

Яркая иллюстрация тому — катастрофическая ситуация, сложившаяся в последнее время с популяцией сайгака (*Saiga tatarica*). Замечу, в 20-х годах прошлого столетия, когда Красных книг еще не было, в результате неконтролируемого промысла численность и ареал этого млекопитающего резко сократились. В 30-е годы в связи с прекращением контрабандного вывоза сайгачьих рогов в Китай и во время Великой Отечественной войны, когда людям было не до сайгака, его численность постепенно начала восстанавливаться. А в 50-е годы стало ясно, что виду ничто не угрожает. Теперь ситуация, похоже, повторяется. Рога сайгака всегда ценились в китайской медицине, а сейчас их стали еще и рекламировать в качестве альтернативы рогу носорога. В результате на китайском рынке резко вырос спрос на рога сайгака, и браконьеры начали истреблять их (прежде всего самцов), что поставило под угрозу существование всей популяции. А ведь до октября 2002 г., когда сайгак был внесен в Красную книгу МСОП, он вообще не числился среди «краснокнижных» видов. Хотя плодовитость сайгака, равная 0.75 дочерей в год, выше, чем у многих других копытных, соответствующая ей вероятность попадания в Красную книгу составляет примерно 0.5. Это совсем не маленькая вероятность: она означает, что каждый второй вид с такой годовой плодовитостью оказывается под угрозой вымирания. Ясно, что даже в периоды высокой численности сайгак нуждается в пристальном внимании экологов и специалистов по охране природы.

Другой пример вида со сравнительно низкой скоростью



Новорожденный сайгаченок.

Фото А.А.Луцкиной

размножения, которого нет в Красной книге, — россомаха (*Gulo gulo*). Это некрупное животное из семейства куньих широко распространено в тайге и лесотундре Евразии и Северной Америки. Низкая плодовитость связана прежде всего с тем, что большинство самок приносят потомство через год [10]. Однако численность россомахи в евразийской части ареала в последние десятилетия весьма стабильна, а потому в Красной книге ее нет. Относительной неуязвимости этого вида способствуют гигантский ареал, скрытный образ жизни, а также всеядность. Как замечает Б.В.Новиков, «россомаха всегда готова съесть все, что можно хоть как-нибудь использовать в пищу». Но не только это держит зверя «на плаву». Россомаха — известный интеллектуал и умелец, о чем можно судить по легкости, с которой она дурачит охотников, обходя идеально замаскированные капканы, избегая встреч, разоряя спрятанные охотниками съедобные припасы. Таких животных трудно втиснуть в рамки каких-либо прозаических коэффициентов, а интеллектуальный индекс пока никто не считал. Однако стоит иметь в виду, что при плодовитости 0.625 дочерей в год ве-



Россомаха. Этому виду со сравнительно низкой скоростью размножения, но весьма стабильной численностью пока ничто не угрожает, хотя вероятность его попадания в Красную книгу примерно такая же, как у сайгака.

Фото А.В.Кречмара

Таблица 2

Вероятность угрозы исчезновения для некоторых «красно-книжных» видов, рассчитанная по годовой плодовитости

Вид	Годовая плодовитость	Вероятность
Зубр	0.20	0.75
Белый медведь	0.30	0.71
Тигр	0.40	0.67
Леопард	0.80	0.46
Выхухоль	1.75	0.10



Белая медведица с медвежонком и тигрица с котенком.

Фото из архива «Природы»



Зяц-беляк.

Фото А.В.Кречмара



Амурский леопард.

Фото Ю.Б.Шибнева

роятность попадания росомахи в Красную книгу — 0.55, т.е. примерно такая же, как у сайгака. Хотя в настоящее время этому медленно размножающемуся виду ничего не угрожает, его «благополучие целиком и полностью зависит от нашего к нему отношения» (Б.В.Новиков).

Новый подход позволяет заблаговременно выявлять уязвимые виды и распределять природоохранные ресурсы между ними пропорционально их вероятности попадания в Красную книгу, а не по принципу «всем сестрам по серьгам». При этом затраты на мониторинг видов, которые находятся в относительной безопасности (т.е. с годовой плодовитостью больше порогового значения — 2.9 дочерей в год), могут составлять некий базовый минимум и быть примерно одинаковыми для разных видов независимо от их плодовитости. На те виды, годовая плодовитость которых меньше порогового значения, напротив, следует тратить больше средств, и они должны распределяться в примерном соответствии с вероятностью их попадания в Красную книгу. Так, вероятность попасть в Красную книгу для белого медведя и амурского тигра примерно одинакова, для леопарда она в полтора раза меньше, а для выхухоли — реликтового вида и эндемика России — в семь раз меньше (табл.2). Можно полагать, что и ресурсов на мониторинг и охрану леопарда и выхухоли по сравнению с белым медведем или тигром должно выделяться примерно во столько же раз меньше. А что происходит на самом деле?

Согласно федеральной целевой программе Российской Федерации на 2002—2010 гг., на мониторинг амурского тигра и белого медведя выделяется 527.1 и 431.4 млн руб. соответственно [11]. Большой объем и примерное равенство выделяемых средств вполне согласуются с высокой и приблизительно одинаковой вероятностью по-

падания этих видов в Красную книгу. Однако доля этих средств в общем объеме затрат далеко не соответствует соотношению между вероятностями: на эти виды приходится 95% ресурсов, выделяемых на мониторинг всех животных и растений Российской Федерации. Если учесть, что в Красной книге России только млекопитающих 65 видов (без учета подвидов) и что многим из них угрожает реальная опасность (амурского леопарда осталось всего 20–30 особей [12], а численность выхухоли за последние 30 лет снизилась в два раза [13]), становится понятным, что имеющихся природоохранных ресурсов катастрофически не хватает.

Я далек от мысли, что вероятность оказаться под угрозой вымирания, рассчитанная по скорости размножения вида, может служить единственным критерием для распределения природоохранных ресурсов. Понятно, например, что организация экспедиции на Крайний Север для изучения состояния белого медведя стоит намного дороже, чем аналогичное обследование выхухоли в Центральной России. Тем не менее распределение ресурсов, учитывающее только экономические и политические соображения и не принимающее во внимание биологические характеристики животных, вряд ли может быть эффективным с точки зрения сохранения



Амурский тигр.

Фото из архива «Природы»

биоразнообразия. Непосредственное практическое следствие из предлагаемого здесь подхода может состоять в том, чтобы, исходя из соотношения вероятностей попадания в Красную книгу и взяв за основу, например, затраты на охрану амурского тигра как одного из наиболее благополучных с точки зрения привлечения общественного внимания видов, оценить, хотя бы примерно, сколько недоделано другим находящимся под угрозой видам. Такие оценки могли бы служить основанием для привлечения дополнительных средств для охраны

животных, — причем именно тех, которым в настоящее время уделяется неоправданно мало внимания. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 01-04-48384.

Я чрезвычайно благодарен А.М.Гилярову, С.Пимму (S.Pimm), И.Хански (I.Hanski), Ю.Ю.Дгебуадзе, В.В.Малахову, Н.А.Формозову, В.Б.Цейтлину, Б.И.Шефтелю, Ю.Шига (Y.Shiga), а также многим другим, способствовавшим выполнению этой работы.

Литература

1. Pimm S.L., Russell G.J., Gittleman J.L. et al. // Science. 1995. V.269. P.347–350.
2. Гиляров А. // Наука и жизнь. 1976. №12. С.132–139.
3. Polishcbuk L.V. // Журн. общ. биологии. 2002. Т.63. №2. С.99–111.
4. Polishcbuk L.V. // Science. 2002. V.297. P.1123.
5. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т.1. М., 1967.
6. MacArthur R.H. Geographical ecology. N.Y., 1972.
7. Млекопитающие // Красная книга СССР. Т.1. М., 1984. С.9–97.
8. Southwood T.R.E. // Theoretical ecology: principles and applications. Oxford, 1976. P.26–48.
9. Brown J.H., Maurer B.A. // Science. 1989. V.243. P.1145–1150.
10. Новиков Б.В. Россомаха. М., 1993.
11. Подпрограмма «Сохранение редких и исчезающих видов животных и растений» // Федеральная целевая программа «Экология и природные ресурсы России (2002–2010 годы)». М., 2001. (http://www.priroda.ru/bibl/knigi/1748_0860_2001.pdf)
12. Млекопитающие // Красная книга Российской Федерации. М., 2001. С.599–750.
13. <http://www.biodiversity.ru/programs/vyuhuhol.html> (сайт Центра охраны дикой природы)

Ледовые сообщества Байкала

Г.С.Бордонский,

доктор физико-математических наук

Читинский институт природных ресурсов СО РАН

Н.А.Бондаренко, Л.А.Оболкина, О.А.Тимошкин,

кандидаты биологических наук

Лимнологический институт СО РАН

Истории изучения организмов, развивающихся в снегах и льдах, уже около двух веков. Тем не менее до недавнего времени хорошо исследованы были только морские сообщества — богатое население льдов Антарктиды и Арктики*, в пресном же льду, как полагают, живые организмы существовать не могут. Считалось, что в нем содержится только пагон — вмерзшие в лед в состоянии анабиоза обитатели водоемов, а также их споры, цисты и т.д., позволяющие им пережить крайне неблагоприятные периоды. К активной жизни они возвращаются лишь после таяния льда. Их даже выделили в специальный класс сообществ — анабиоценоз, чтобы отличить от криофильного населения морских льдов.

Причина неудач в исследованиях пресных льдов очевидна. Несмотря на то что морские криофильные организмы обитают и в снежных лужах на поверхности льда, и во влажной прослойке между снегом и льдом, и даже на нижней его поверхности, наиболее богата

и разнообразна жизнь в самой толще, которая пронизана густой сетью полостей и капилляров (ледовой интерстициалью), заполненных насыщенным раствором морских солей. Пресный же лед монолитен, в обычном состоянии его интерстициаль занимает слишком малый объем для развития организмов крупнее бактерий, потому поиск там активной жизни бессмыслен. Другое дело — снежно-ледовая каша на пресных ледовых покровах; в таком своеобразном биотопе на поверхности альпийских и пиренейских озер не так давно обнаружено специфическое сообщество из бактерий, водорослей и простейших (жгутиковых и инфузорий) [1]. Но ведь хорошо развитая система заполненных водой пор и каналов возникает и в рыхлом, тающем льду. Там появляется биотоп, где могут развиваться пресноводные ледовые сообщества [2]. Помимо этого в период между интенсивным намерзанием и таянием нижняя поверхность пресного льда может обрастать водорослями, что впервые было описано на р.Амур [3]. Мы же, исследовав байкальские ледовые образования, обнаружили, что, как и в хорошо изученных системах Арктики, там складывается сообщество из пелагических и бентосных инфузорий, колов-

раток, ракообразных, мальков рыб и даже турбеллярий. Более того, оказалось, что эти сообщества — один из ключевых моментов в жизни биоты озера: к периоду их развития (марту-маю) приурочены миграции на литораль гигантских планарий, размножение некоторых видов гаммарид, моллюсков, коттоидных рыб, выклев и скат личинок сиговых рыб и т.д. [4].

* * *

По основным структурным характеристикам ледовые сообщества Байкала во многом схожи с морскими. В обоих случаях наблюдается ярусность вертикального и неравномерность горизонтального распределения; одни и те же или близкие роды водорослей, жгутиковых и инфузорий доминируют и в морском, и в пресном льду. Как ни удивительно, различия существуют лишь на видовом уровне, несмотря на то, что среды обитания полярны: гипергалинная (почти насыщенная) морская и практически дистиллированная талая байкальская вода. Есть сходства и в таксономическом составе других групп организмов как в сообществе внутри льда, так и в биоценозах обрастаний.

В снежных лужах на поверхности байкальского льда развиваются хламидомонадовые

* Подробнее см., напр., публ.: Мельников ИА, Ривьер ИК Жизнь во льду и подо льдом // Природа. 1984. №1. С.68—80; Чесунов АВ, Мельников ИА Нематоды — обитатели арктического льда // Там же. 1996. №7. С.52—61.

и инфузории. В прослойке влажного снега под сугробами активной жизни нет, а вот в системе пор и каналов толщи льда формируются богатые сообщества, состав которых зависит от доминирующих в планктоне озера видов водорослей. К настоящему времени зарегистрировано два варианта таких сообществ: на основе эндемичных динофитовых *Gymnodinium baicalense* и *Peridinium baicalense* и диатомовых водорослей рода *Aulacoseira*. И в том и другом варианте водорослям сопутствуют инфузории (в первом случае — простоматиды, во втором — *Strombidium* sp. из отряда малоресничных), круглогодичные неэндемичные коловратки *Keratella cochlearis*, *K. quadrata*, *Filinia terminalis*, *Kellicottia longispina* и эндемичный рачок *Epischura baicalensis*.

Когда вся толща льда, за исключением верхнего не насыщенного водой слоя (до 10 см), пронизана порами, в диатомовых сообществах устанавливается строгое вертикальное распределение: в приповерхностных слоях (10—40 см) скапливаются водоросли, коловратки и рачки, в нижних (ниже 40 см) концентрируются инфузории. В динофитовых сообществах Байкала четкой структуры в толще льда нет: колонии гимнодиниумов и перидиниумов распределяются по всей толще. Эти водоросли начинают интенсивно размножаться немного раньше возникновения системы вертикальных пор во льду. Одиночные клетки формируют легко рассыпающиеся слизистые колонии в бокаловидных, протянувшихся под их действием пустотах. Колонии по мере увеличения размеров и веса постепенно опускаются и в конце концов попадают в воду, способствуя тем самым разрушению льда. В слизи колоний поселяются крупные палочковидные бактерии, не зарегистрированные ранее в составе бактериопланктона Байкала. Для обоих типов сообществ характерно весьма не-



Колонии динофитовых водорослей в толще льда (вверху) и нити диатомовых водорослей, свисающие с нижней поверхности льда.

Фото О.А.Тимошкина

равномерное пятнистое горизонтальное распределение. Количество ледовые обитатели превышают эти же виды в подледном планктоне: по предварительной оценке, за короткий период (две-три недели) в ледовой интерстициали нарастает фитомасса, равная трети годовой первичной продукции озера.

В нижнем ярусе криофильные сообщества (обрастания нижней поверхности льда) в отличие от обитателей ледовой толщи представлены не только планктонными, но и бентосными формами. С помощью подводной видеосъемки, проведенной на литорали озера, на нижней поверхности льда были

обнаружены огромные скопления диатомовых водорослей в виде слизистых пленок, «бород», «шнуров» длиной от нескольких сантиметров до нескольких метров. Верхние части колоний расположены глубоко в толще льда. В конце марта — начале апреля эти обрастания, достигая определенной длины, отрываются и медленно оседают на дно подобно огромным падающим хлопьям снега. На дне водоросли продолжают размножаться, и их слизистые пленки покрывают губки, макрофиты и другие организмы и предметы. На очистившейся поверхности льда очень быстро развиваются новые колонии. Таким образом, за полтора-два месяца на дно литорали оседает два-три «урожа» водорослей, служащих кормом животным бентоса — крупным инфузориям, коловраткам, моллюскам, гаммаридам и др. Любопытно, что в торосистой части озера на неровной поверхности льда, в различных впадинках, трещинах развиваются преимущественно макрофиты, а не планктонные водоросли. Эти «микрорастения» в изобилии заселяются бентическими простейшими и беспозвоночными животными.

При общей схожести все же имеются и принципиальные различия между морскими и пресноводными сообществами, что в первую очередь связано с кратковременным существованием пресного льда. Кроме того, формирование сообществ пресноводных криофилов на разных ярусах разнесено по времени, а в морском льду они существуют одновременно. Известно, что в морских системах обнаружены специфические виды, живущие только во льду, в богатых же эндемиками байкальских сообществах таких видов (кроме бактерий) пока не обнаружено. Основным поставщиком для этих эфемерных сообществ служит планктон озера, а в литорали — еще и бентос. Из трех возможных путей заселения байкальского льда главный для сообществ ледовой интерстициали, по нашим данным, — пагон, а для обрастаний — подледная вода; заселение льда из атмосферы здесь незначительно.

Пока непонятна и кажется невероятной необычно высокая скорость развития ледовых водорослей и простейших как внутри байкальского льда, так и в его обрастаниях. Ежедневный прирост водорослей можно измерять чуть ли не в сантимет-

рах. И это происходит при температуре, близкой к нулю, и почти полном отсутствии биогенов. Вода в Байкале, в отличие от морской, настолько слабо минерализована, что неясно, чем питаются многочисленные ледовые водоросли озера. Возможно, сказывается пресловутый феномен талой воды, на химический состав которой влияют поступления неорганического и органического материала с атмосферными осадками и эоловым переносом. А может, эффект кратковременности существования таких сообществ, когда активизируются различные регуляторные механизмы на клеточном или популяционном уровне, как это происходит в пустынях в кратковременный период дождей или на севере во время короткого полярного лета. На наш взгляд, причину ускоренного роста ледовых протистов в первую очередь нужно искать в природе физико-химических процессов, протекающих при таянии льда.

Ясно, что обнаружение в ледяном покрове Байкала активной жизни вызвало много вопросов, решать которые предстоит специалистам разного профиля — от физиков до цитологов, физиологов и даже медиков. ■

Литература

1. *Felip M., Satter B., Psenner R. et al.* // Appl. and Environ. Microbiol. 1995. V.61. №6. P.2394—2401.
2. *Оболкина Л.А., Бондаренко Н.А., Дорощенко Л.Ф. и др.* // ДАН. 2000. Т.371. №6. С.815—817.
3. *Юрьев Д.Н.* // Эколого-биохимические исследования на Дальнем Востоке. 1996. С.79—96.
4. *Тимошкин О.А., Бондаренко Н.А., Оболкина Л.А. и др.* // Третья Верещагинская байкальская конференция: Тезисы докладов и стендовых сообщений. 2000. С.232—233.

Поэзия Кавказских гор

Памяти моего отца Георгия Павловича Леонова.

М.Г.Леонов

*Но свой любимый, свой родной Кавказ
Носил в душе повсюду и всегда.*

Кайсын Кулиев

Земля — планета равнинная. Горы занимают лишь 35% ее площади, но именно они всегда привлекали внимание людей как нечто грандиозное, волнующее ум и воображение. Они полны очарования и внутренних противоречий: огненная лава вулканов и покровы ледников; яркое солнце и снеговые тучи; волшебная тишина и грохот обвалов; зеленые альпийские луга и скальные обрывы; прозрачные реки и селевые потоки камней и грязи. Но горы — и источник жизни: это рудники и пастбища, дающие пищу, одежду, сырье; это аккумуляторы влаги, законсервированной в ледовых массивах. И наконец, горы — один из наиболее ярких и заметных элементов земной коры. Проблема их строения и происхождения издавна не давала покоя естествоиспытателям.

Древние ученые основывали свои мнения на каких-либо выдающихся явлениях, поражающих воображение, или же просто на умозаключениях. Так Эмпедокл Агрегентский за 450 лет до н.э. связывал горообразование с землетрясениями и приписывал его «центральному огню». Страбон причину нагромождения гор усматривал в напоре газов и паров, выделявшихся во время вулканических



Михаил Георгиевич Леонов, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией тектоники консолидированной коры Геологического института РАН. Область научных интересов — тектоническая эволюция консолидированной коры континентов — от ранних этапов ее становления до новейшей тектоники. Много лет проработал в горах Кавказа. Неоднократно публиковался в «Природе».

извержений. Авиценна считал их остатками неровностей земной поверхности, уцелевшими от размыва и разрушения. А учение Аристотеля о пещерах и провалах, порождавших горы, было в 1641 г. реанимировано Р.Декартом и имело таких последователей, как Г.Лейбниц, Ж.Делюк, Ж.Бюффон и др.

Леонардо да Винчи первым сказал, что горы образуются на месте некогда обширных и глубоких морей. Бюффон считал горы результатом геологических катастроф. Ученые-нептунисты первое место в горообразовании отводили «всемирному потопу», во время которого сформировались морские осадки, впоследствии смятые в складки и превращенные в возвышенности. Плутонисты же отдавали предпочтение «поднятию морских осадков силой подземного жара», что нашло отражение в изданной в 1788 г. книге шотландца Д.Геттона «Теория Земли». Так или иначе, вопрос о происхождении гор во все века волновал умы ученых, путешественников и просто любознательных граждан.

Горы обычно образуют цепи и пояса, вытянутые на многие сотни и тысячи километров. Один из поясов — Альпийско-Гималайский — протягивается в широтном направлении от Атлантики до Восточной Индии. Кавказ расположен в его центральной части, на острие так называемого Аравийского синтаксиса — выступа Аравийской платформы, глубоко вклинившегося в тело Альпийско-Гималайского орогена.

Кавказ — красивейший район Земли, и впечатление от него незабываемо. «Вдруг он увидел... чисто-белые громады с их нежными

© М.Г.Леонов



Схема геологического строения Кавказа.

очертаниями и причудливую, отчетливую воздушную линию их вершин и далекого неба... Сначала горы только удивили... потом обрадовали; но потом... он мало-помалу начал вникать в эту красоту и почувствовал горы» (Л.Н.Толстой).

Именно задача «почувствовать горы» и стоит перед геологом. Этот очерк написан по материалам известных ученых-геологов Азербайджана, Армении, Грузии, России. Перечислить всех невозможно — список кавказских геологов огромен. Использован и семейный архив. На Кавказе в разные годы работали мой отец Г.П.Леонов, мой старший брат Ю.Г.Леонов и я сам.

Наука обладает огромным объемом наблюдений, позволяющих с большой достоверностью реконструировать геологическую эволюцию горных сооружений и определить их место в структуре и истории Земли. И Кавказ, будучи одним из наиболее благодатных объектов, сыграл немалую роль в получении фактических данных, в зарождении научных идей, в понимании закономерностей размещения полезных ископаемых. А красота и величие Кавказских гор всегда вдохновляли писателей, художников и поэтов: «Под ним Казбек, как грань алмаза, снегами вечными сиял, и, глубоко внизу чернея, как трещина, жилище змея, вился излучистый Дарьял». И: «Роскошной Грузии долины ковров раскинулись вдали; счастливый, пыш-

ный край земли!» (М.Ю.Лермонтов). Цитировать «кавказских» поэтов, как и «кавказских» геологов, можно до бесконечности... Но все-таки, что же такое Кавказ с точки зрения геолога?

Понятие «Кавказ» объединяет в себе обширную горную страну, расположенную к югу от Русской равнины и занимающую область перешейка между Каспийским морем на востоке и Черным и Азовским — на западе. Северная геологическая граница проходит по Кумо-Манычской низменности; южная — практически совпадает с государственными границами Азербайджана, Армении и Грузии с Турцией и Ираном. Южнее простираются горные цепи Эльбурса (не путать с Эльбрусом!) и Северной Анатолии.

Народы, населяющие Кавказ, научились использовать природные богатства в далекой древности — сохранились следы доисторических горных выработок, где добывались золото, серебро, свинец, медь, нефть, уголь, строительные материалы. Но начало собственно геологического изучения Кавказа связано с экспедициями, предпринятыми в конце XVIII в. по инициативе М.В.Ломоносова. Позднее, в 19-м столетии, здесь работали А.А.Мусин-Пушкин, Дюбуа де Монпере и др. В 40—70-х годах XIX в. исследования проводил Г.В.Абих. Немец по рождению и действительный член Российской академии наук, он по справедливости за-

служил звание отца геологии Кавказа. 60—80-е годы 19-го столетия отмечены деятельностью Кавказского горного управления. В тот же период А.А.Иностранцевым и Ф.Ю.Левинсон-Лессингом начаты изыскания, связанные со строительством Транскавказской железной дороги. Регион становится одним из эталонов при создании геологических моделей горных стран. В 1897 г. сюда направляется экскурсия VII Международного геологического конгресса.

На рубеже XIX и XX вв. к исследованию Кавказа привлекаются специалисты Геологического комитета. В конце 20 — начале 30-х годов XX в. в Закавказье (в Баку, Эривани, Тифлисе) возникают геологические школы, возглавляемые видными учеными. Вклад исследователей Кавказа в развитие мировой науки не ограничивается лишь получением региональных геологических знаний. Кавказ становится одним из полигонов, на котором разрабатываются идеи мирового класса и значения.

Геологическое строение

Современное строение Кавказа отражает совокупность геологических процессов, происходивших здесь в течение последних 500—550 млн лет. Но главным образом — от раннего мезозоя (250 млн лет) до наших дней. Данный этап именуется альпийским и соответствует времени существования на месте Альпийско-Гималайского пояса древнего океана Тетис (имя которому дано в честь древнегреческой богини Тетии — сестры и жены Океана!). Позднее океан «захлопнулся» между сдвигавшимися Афро-Индо-Аравийским (на юге) и Евро-Азиатским (на севере) континентами и превратился в протяженный горный пояс с очень сложным внутренним строением. Северный ряд континентов назван Евразией, южный — Гондваной.

В пределах Кавказа можно выделить четыре главные орографические зоны (см. табл.). Каждой из них соответствует определенный геологический элемент, обладающий особым строением, историей и набором полезных ископаемых.

Предкавказская (Скифская) молодая платформа. В ее строении участвуют два этажа. Нижний — фундамент — представлен породами среднего и верхнего палеозоя (430—245 млн лет), сильно измененными и перекристаллизованными (метаморфизованными), смятыми в складки и пронизанными гранитами. Верхний — чехол — сложен полого залегающими мезозойскими (250—65 млн лет) и кайнозойскими (от 65 млн лет), преимущественно песчано-глинистыми и карбонатными морскими отложениями. Бурение и геофизические исследования показывают, что фундамент приподнят в средней части Предкавказья (Ставропольском поднятии) и постепенно погружается к западу и востоку. С юга Скифская платформа обрамлена поясом передовых (краевых) прогибов (Кубанским — на западе, Терским и Кусаро-Дивиченским — на востоке), которые заполнены мощными толщами молассовых* отложений третичного (45—40 млн лет) возраста.

Характерный элемент геологии Предкавказья и одна из его курортных и туристических достопримечательностей — район Кавказских минеральных вод с его живописно разбросанными вершинами Бештау, Машук, Змеиной, Железной и др. Пейзаж здесь неповторим и сочетает мягкую прелесть степной равнины и суровую красоту гор: «Вид с трех сторон у меня чудесный. На запад пятиглавый Бештау синее, как «последняя туча рассеянной бури»; на север поднимается Машук, как мохнатая персидская шапка... а на краю горизонта тянется серебряная цепь снеговых вершин, начинаясь Казбеком и оканчиваясь двуглавым Эльбрусом» (М.Ю.Лермонтов).

Отрывок этот отражает не только особенности пейзажа, но и характерные черты геологии Кавказского хребта. Два величественных, совсем еще недавно действовавших вулкана фиксируют западное и восточное окончания кристаллического ядра Большого Кавказа — самого высокого и одного из наиболее активных участков. Возникновение Минераловодских гор и мощные выбросы растворов связаны с проявлением вулканизма —

* Моласса — относительно мелководные грубообломочные отложения (пески, галечники), образовавшиеся в результате разрушения растущих гор.

Таблица

Орографические зоны	Структурно-геологические зоны
Предкавказская равнина	Предкавказская (Скифская) молодая платформа и зона предкавказских краевых прогибов
Горная система Большого Кавказа	Альпийская складчатая область и поднятие Большого Кавказа
Закавказская, или Рионо-Куринская впадина	Закавказский срединный массив (Азербайджанская и Грузинская глыбы)
Горная система Малого Кавказа	Складчатая область Малого Кавказа (Понтийско-Триалетская складчатая зона; Малокавказская офиолитовая* зона; Араксинский межгорный прогиб)

* Офиолиты — комплекс глубинных горных пород, обогащенных магнием и железом, первично принадлежащих верхней мантии и слагающих кору современных океанов и океанических впадин геологического прошлого.



Эльбрус — высочайшая вершина
Большого Кавказа.

Фото Т.Ю.Тверетиновой,
компьютерная обработка
М.Г.Леонова

отголоском мощных вулканических процессов, охвативших в недалеком прошлом территорию Малого Кавказа и расположенные южнее горные цепи Ирана и Турции.

Состав горных пород, особенности их залегания и строение земной коры свидетельствуют о том, что территория в течение мезозоя и части кайнозоя (т.е. на протяжении примерно 230 млн лет) представляла собой приподнятый континентальный блок земной коры, покрытый мелководным морем, относительно стабильный и не подверженный серьезным геологическим пертурбациям. Однако с началом формирования горной системы Большого Кавказа на краю этой стабильной платформы возникали прогибы, которые служили вместилищем огромных масс грубого материала, образовавшегося в результате разрушения и размыва гор. Процесс разрушения, переноса материала и заполнения краевых предгорных впадин продолжается и поныне.

Большой Кавказ. Это мощная горная страна, простирающаяся от Таманского п-ова на северо-западе, где «берег обрывом спускался к морю... и внизу с непрерывным ропотом плескались темно-синие волны» (М.Ю.Лермонтов) до Апшеронского п-ова на юго-востоке, где «стучатся о пристань валы Каспийского моря» (В.Брюсов). А между Каспийским и Черным морями — система высоких, вытянутых параллельно друг другу хребтов. И на всем протяжении над миром господствует водораздельный хребет, и «Кавказских гор седые изваянья стоят вдали, одеты синей мглой» (И.Чавчавадзе).

Горное сооружение Большого Кавказа представляет собой асимметричную структуру, осевая зона (ядро) которой, известная как зона поднятия Главного хребта, является выступом древнего кристаллического фундамента. Ядро обрамлено чехлом более молодых пород, образующих так называемые крылья поднятия. Структура и набор

горных пород южного и северного крыльев различны. Северное сложено полого наклоненными или смятыми в относительно простые складки мелководно-морскими отложениями мезозойского, частично кайнозойского возраста. Южное отличается большой мощностью слагающих его отложений, верхняя часть которых представлена флишем*, и очень напряженной структурой. Породы смяты в многочисленные сложные складки и разбиты надвигами и покровами. Асимметрия строения крыльев и направление сдвига показывают, что на Большом Кавказе общее смещение горных масс ориентировано в южном направлении. Все геологические структуры в направлении от центрального ядра к западу и востоку постепенно погружаются под более молодые отложения и скрываются в водах Черного, Азовского и Каспийского морей.

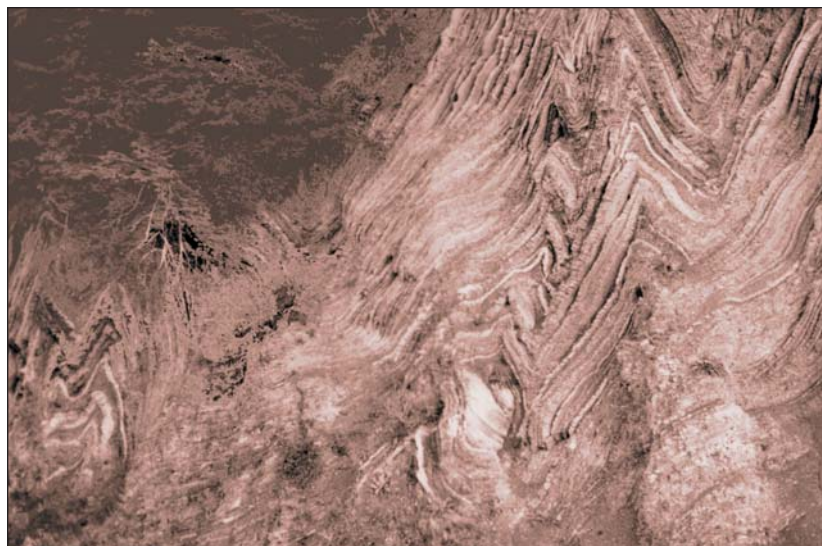
В кратком палеогеографическом очерке невозможно описать все стороны геологической эволюции Большого Кавказа, поэтому о ранних этапах его развития мы скажем лишь несколько слов. В палеозое (560—250 млн лет) центральная часть и северный склон представляли собой сложно расчлененный блок земной коры с зияниями (типа Красного моря), которые были отделены друг от друга поднятиями (карбонатными платформами, вулканическими дугами). К концу палеозоя (около 250 млн лет тому назад) в результате общего сжатия бассейны «захлопнулись», сформировалась сложная структура области и образовалась новая континентальная кора, которая причленилась к расположенному севернее Скифскому континенту. От пород и структур того времени остались лишь небольшие фрагменты.

В начале мезозоя на месте Большого Кавказа существовал обширный морской бассейн, запол-

* Флиш — морские отложения, формирующиеся на континентальном склоне морей и океанов и отражающие активный тектонический режим области их образования.

Породы флиша смяты в сложные складки.

Фото А.В.Маринина



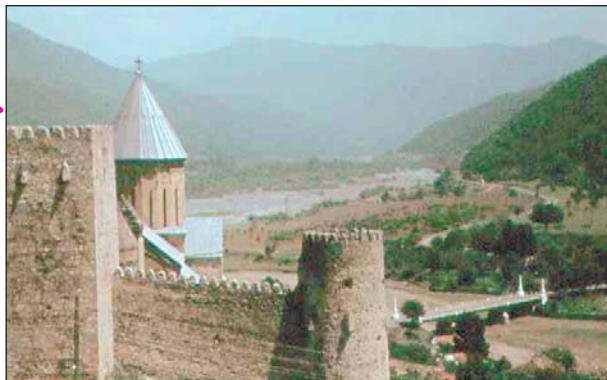
ненный обломочными породами большой мощности и характеризовавшийся проявлением подводного вулканизма. Растяжение земной коры в то время не было значительным и не привело к возникновению океана. Затем наступил кратковременный период сжатия. Сформировалась складчатая структура осадков с многочисленными надвигами и тектоническими покровами. Произошло разделение единого бассейна на две зоны. Северная, консолидированная (затвердевшая), была припаяна к южному краю Скифской плиты и размывалась. Южная — продолжала существовать в виде обширного морского бассейна, в котором, в условиях нестабильного тектонического режима, накапливались мощные толщи флиша и олистостромов*. С олигоцена (35 млн лет тому назад) началось общее сжатие Гималайско-Альпийского пояса, захватившее и Большой Кавказ. Зажатый между двумя жесткими массами — Скифской платформой на севере и Закавказским массивом на юге — бассейн Большого Кавказа закрылся. Его осадки выплескивались в виде тектонических покровов на Закавказский срединный массив. Сжатие в тисках континентальных блоков привело к выдавливанию горных масс вверх. Одновременно породы вдавливались и вниз, в полтора-два раза увеличивая толщину земной коры и образуя так называемые корни гор.

Закавказская межгорная зона (срединный массив). Покидая Большой Кавказ с его снежными вершинами и горными потоками и двигаясь в южном направлении — туда, где «светлые долины, орошаемые веселой Арагвою, сменили мрачные ущелья и грозный Терек» (А.С.Пушкин), — мы попадаем в район Закавказских межгорных впадин. Граница между зонами отмечена резким изменением не только геологии, но и рельефа. Южный склон Большого Кавказа сложен смятыми

* Олистостромы (пласты-оползни) — глыбовые хаотические породы, свидетельствующие об интенсивных движениях земной коры.

в складки черными юрскими сланцами и более молодыми пестрыми породами мезозойского флиша. «Громадные горы вокруг, взметнувшие кверху все тело» (В.Пшавела). Далее же расположена зона с невысоким и слаборасчлененным рельефом, протягивающаяся от Черного до Каспийского моря. Она — естественная географическая и геологическая граница между Большим и Малым Кавказом. Строение и морфология гор умело использовались людьми. В древности вдоль этой линии, как «ущелья древний аванпост» (Г.Леонидзе), строились крепости. Сейчас здесь располагаются гидроэлектростанции (например, Ингульская ГЭС) и водохранилища. Нельзя не отметить, что эта область — место разведения виноградников и производства прекрасных грузинских вин — цинандали, гурджаани, хванчкара и многих, многих других. И как тут не вспомнить: «Человек бывает старым, а барашек молодым. И под месяцем поджарым с розоватым винным паром поплывет шашлычный дым» (О.Мандельштам).

Закавказская зона состоит из трех сегментов: Грузинской и Азербайджанской глыб и разделяющего их Дзирульского кристаллического массива. Глыбам соответствуют Рионская и Куринская межгорные впадины, заполненные мелководными карбонатными и терригенными отложениями мезозоя и грубыми молассаами орогенного этапа. На поверхность массива выходят древние (докембрийские и палеозойские) породы фундамента. По его периферии обнажаются породы чехла, главным образом карбонатные. Они образуют причудливые и чрезвычайно эффектные формы: «Рой призраков в воздухе пыльном клубит. Столбы меловые гарцуют как кони» (В.Гаприндашвили). От центра зоны (Дзирульского массива) все породы, слагающие Куринскую и Рионскую впадины, полого погружаются в западном и восточном направлениях и уходят под воды Черного и Каспийского морей. Можно полагать, что Чер-



Крепости — неотъемлемый элемент пейзажа сочленения флишевой зоны Южного склона Большого Кавказа и Закавказского массива. Крепость Ананури на Военно-Грузинской дороге (р.Арагви).



Среднегорный рельеф Дзирульского массива.

Фото автора

ное море и южная часть Каспийского — естественное продолжение впадин, которые не заполнились пока осадками и не подверглись горообразующим процессам.

В раннеальпийское время (250—145 млн лет) Закавказская межгорная зона была относительно приподнятым элементом земной коры, типа карбонатной платформы (наподобие Багамской банки в Атлантическом океане или Маскаренского хребта — в Индийском) или небольшого континента. В период складчатости и горообразования, который начался примерно 30—25 млн лет назад и продолжается до наших дней, эта область (кроме Дзирульского массива) стала прогибаться и заполняться продуктами разрушения растущих к северу и югу гор Большого и Малого Кавказа. Море постепенно откатывалось от центра структуры в западном и восточном направлениях, и к нашему времени от некогда огромного единого бассейна сохранились лишь реликтовые ванны Черного, Азовского и Каспийского морей.

Складчатая зона Малого Кавказа. Она представляет сложную систему хребтов, вулканических нагорий и плато северной части Армянского нагорья. В отличие от Большого Кавказа здесь отсутствует единый хребет. В любом пересечении вырисовывается не менее двух-трех хребтов, разделенных глубокими продольными долинами. Рельеф не столь расчленен, как на Большом Кавказе. Горы менее величественны, нет сколько-нибудь значительных ледников. В общем, «новые горы, новый горизонт». И новая, неповторимая красота диких черно-желтых скал и зеленых долин, над которыми с незапамятных времен «на ясном небе белела снеговая, двуглавая гора... Это Арарат... Жадно глядел я на библейскую гору, видел ковчег, причаливший к его вершине с надеждой обновления жизни, — и врана, и голубицу излетающих, символы казни и примирения...» (А.С.Пушкин).

Малый Кавказ имеет более сложное геологическое строение, что связано с его положением во внутренних, наиболее подвижных частях Альпийско-Гималайского пояса. В его структуре выделяются зоны вулканогенных прогибов и вулканических дуг, цепочкой протягивающихся вдоль южного борта Закавказского срединного массива. Южнее расположенная область с квазиplatformенным развитием в палеозое—начале мезозоя, впоследствии (в альпийское время) расчлененная на многочисленные поднятия и прогибы. Между ними находится узкий Севано-Акеринский офиолитовый пояс с очень сложным геологическим строением. Здесь обнажены породы чрезвычайно пестрого состава, облика и цвета. Они известны в геологической литературе под названием «цветной меланж». Состав пород, структура и положение в разрезе земной коры свидетельствуют, что пояс представляет собой тектонический шов, образовавшийся на месте некогда обширного океана Тетис.

Геологическое строение района и взаимоотношения его отдельных элементов в значительной степени замаскированы молодыми вулканическими излияниями. На большей части территории сформировался мощный панцирь из вулканических пород — вулканические щиты. Наиболее значительные из них — Джавахетский (на севере) и Армянский (на юге). Хаотично разбросанные вулканические горы — одна из наиболее впечатляющих черт региона. И над всем этим величественным и диким краем, как корона с острыми зубцами, возвышается черная масса вулкана Арагац (Алагез). «Алагез торчал у меня перед глазами, как «здрате» и «прощайте»... Кусок Алагеза жил тут же со мной... На подоконнике... валялся увесистый образец черного вулканического стекла — обсидиана. Визитная карточка... забытая какой-нибудь геологической экспедицией» (О.Мандельштам).

Почти у вершины Арагаца расположена известнейшая Бюраканская астрофизическая обсерватория.

С юга структуры Малого Кавказа обрамлены Араксинским межгорным прогибом, который состоит из нескольких нанизанных на единую ось впадин (Арагатской, Нахичеванской) и разделяющих их поднятий-перемычек. Впадины заполнены мощными толщами молодых (вплоть до современных), грубых молассовых отложений, переслаивающихся с лавовыми потоками.

Геологическая история Малого Кавказа чрезвычайно сложна. Но можно выделить две самые главные и характерные особенности. Во-первых, на протяжении большей части мезозоя (около 200 млн лет) территория Малого Кавказа представляла собой часть обширного и глубокого океана; а во-вторых, здесь проявилась интенсивнейшая вулканическая деятельность, сравнимая по мощи лишь с наиболее активными вулканическими районами мира (Исландией, Камчаткой). Уже в раннем мезозое к югу от Закавказского микроконтинента располагалась малокавказская ветвь океана Тетис. Еще южнее находились микроконтиненты Анатолийско-Иранской области. Где-то на рубеже 180 млн лет тому назад образовался Закавказский вулканический пояс типа островной дуги (как Камчатка или Курильские о-ва). Началось общее сжатие и постепенное закрытие океанического пространства за счет сближения микроконтинентов и общего движения Индо-Аравийской платформы к северу. Примерно на рубеже 100—85 млн лет тому назад Малокавказский бассейн закрылся. На его месте сформировались узкие швы, в которых были зажаты фрагменты пород океанической коры. Образовался единый континентальный блок, неоднократно подвергавшийся тектонической переработке и деструкции, что, в частности, выразилось в массовом проявлении вулканизма.



Цветной серпентинитовый меланж — это почти все, что осталось от палеоокеана Тетис.

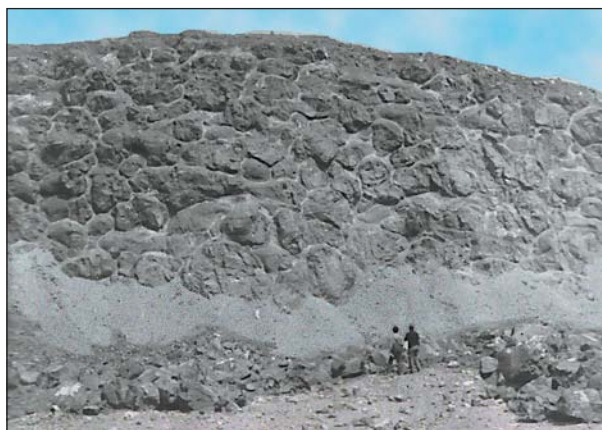
Фото А.Л.Книппера

Общая геодинамика Кавказа

Ознакомившись с геологическим строением Кавказа и его отдельных сегментов, постараемся в обобщенном виде реконструировать события, приведшие к возникновению величественного горного сооружения. Древняя (докембрийская и палеозойская) его история известна лишь фрагментарно. Молодые процессы стерли с лица Земли многие следы давних событий. Но с рубежа 250—240 млн лет тому назад (раннего мезозоя) развитие Кавказа можно реконструировать достаточно определенно.

Сегодня общепринято: формирование структуры и облика Кавказа связано с закрытием обширных бассейнов, принадлежащих мезозойскому океану Тетис. Произошло «схлопывание ладошек» Африкано-Аравийской (на юге) и Евразийской (на севере) литосферных плит. Движение Гондваны (южной системы континентальных плит) к северу вызвало общее сжатие земной коры и сокращение океанических пространств. Глубоководные участки океанической плиты, островные дуги, подводные вулканы и краевые зоны материков в результате сжатия и субдукции (погружения под континент) исчезли с поверхности Земли. «Но где же все-таки Гондвана?.. Чтоб целый материк исчез!» — восклицал Л.Мартынов. Нет, материк не исчез, а вот океан Тетис в процессе геологической эволюции исчез, и на его месте возникли протяженные и высокие горные массивы, в том числе и Кавказ.

В палеозое северная часть Кавказа представляла собой континентальную окраину океана Палеотетис. Вначале она походила на современную западную (пассивную в тектоническом отношении) окраину Атлантического океана, а затем трансформировалась в окраину типа Южно-Американского побережья Тихого океана, которая славится



Шаровые лавы, образовавшиеся в результате вулканических излияний на дне древнего океанического бассейна.

Фото автора

мощным проявлением вулканических процессов. Южная часть Кавказа, Иран и почти вся Анатолия были в то время относительно пассивной краевой частью Гондваны. Между континентальными массами и располагался Палеотетис. В конце палеозоя произошло его закрытие. Осталась лишь система реликтовых морских бассейнов и разделяющих их микроконтинентов.

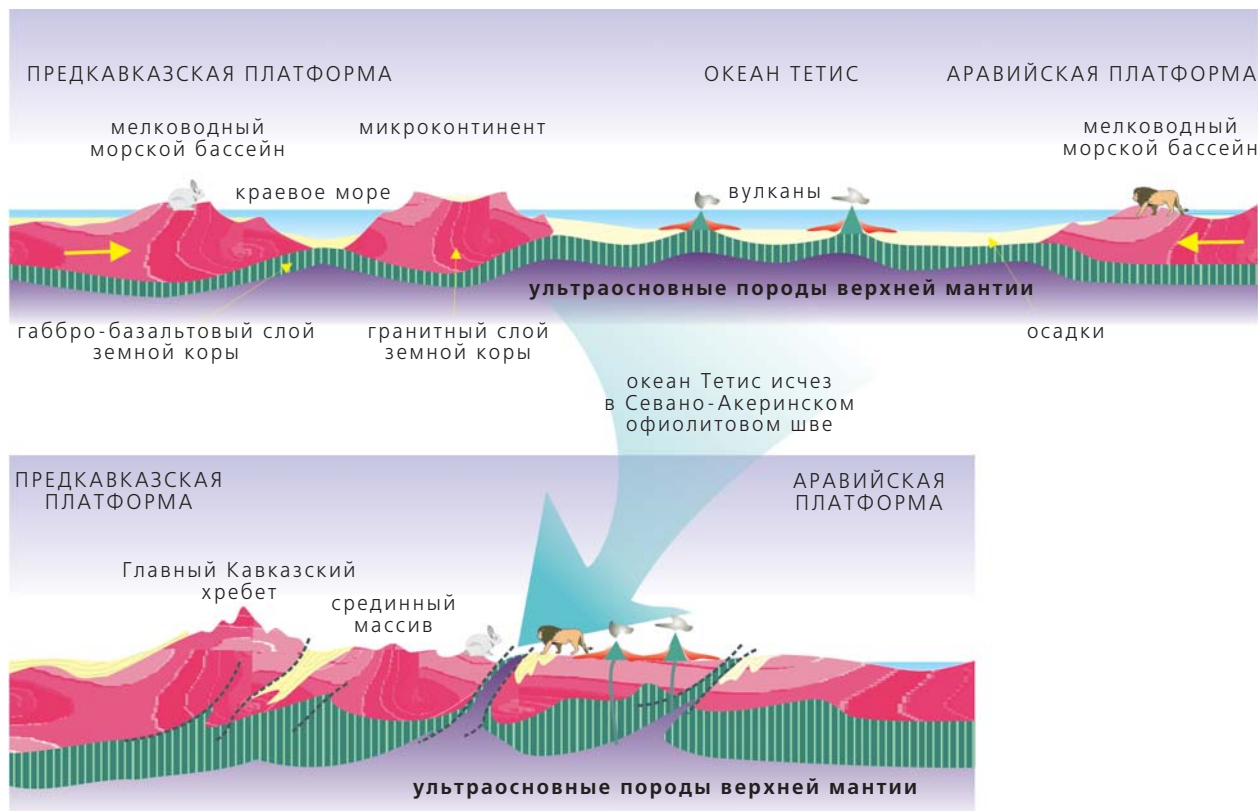
В начале мезозоя (триас—ранняя юра) при общем растяжении земной коры сформировался новый океан — Неотетис, или собственно Тетис. На месте Большого Кавказа было краевое море, обрамленное с севера Скифской платформой. К югу от бассейна Большого Кавказа находился приподнятый Закавказский срединный массив (микроконтинент). По его южному краю протягивалась зона вулканогенных прогибов и островных дуг. А еще южнее — в области современного Малого Кавказа — располагалось обширное пространство океана Тетис.

Чтобы представить себе Кавказ мезозойского времени, нужно взять географический атлас и посмотреть на восточную окраину Азиатского континента, граничащего с Тихим океаном. Мы увидим если и не полную аналогию, то принципиально сходную картину: Азиатский континент — Скифская платформа, Охотское море — бассейн Большого Кавказа, Камчатка и Курильские о-ва — Закав-

казский срединный массив и расположенные на его южном борту вулканические дуги, Тихий океан — Тетис, Американский континент — Гондвана.

С начала триаса до середины мелового периода (250—100 млн лет) на рассматриваемой территории происходило много геологических событий (складчатость, вулканизм, метаморфизм), но они существенно не меняли общий стиль развития. Крупные структурные перестройки произошли в середине юрского и мелового периодов (около 100 млн лет назад), когда из-за сближения кавказской окраины океана Тетис и расположенных к югу от него микроконтинентов сузилась, а затем и полностью замкнулась океаническая ветвь Малого Кавказа. В результате образовался Севано-Акеринский офиолитовый шов — одна из наиболее впечатляющих структур Малого Кавказа. В зоне, ширина которой не превышает нескольких десятков километров, исчез целый океан!

Следующее оживление тектонического режима фиксируется в среднем—позднем эоцене (примерно 50—35 млн лет тому назад). В это время при сокращении пространства, вызванного продолжающимся движением Гондваны к северу, практически закрылись все морские бассейны. Прошла мощная складчатость и скучивание всех отложений и блоков в единую сложную мозаику. Закончилась океаническая стадия развития Кавказа.



Реконструкция эволюции Альпийско-Гималайского пояса (Кавказское пересечение). Верхний профиль — около 250 млн лет тому назад; нижний — современная структура.

Дрейф Гондваны продолжался. Однако на месте океана с относительно тонкой земной корой, которая легко погружалась под континент, теперь была довольно толстая и прочная масса разнообразных блоков, пластин, массивов. Они начали коробиться, наезжать друг на друга, как ледовые торосы. Земная кора стала изгибаться и деформироваться. Образовался дефицит пространства, и материал перемещался теперь не в горизонтальном, как раньше, а в вертикальном направлении. Часть горных пород, выжатая вверх, сформировала горные массивы, а породы, выжатые вниз, — корни гор. Поскольку дрейф континентов продолжается и в настоящее время, продолжается сжатие и развитие горного рельефа. Рост Кавказских гор вызван не только короблением земной коры в результате сжатия континентальных тисков. Причиной этого явления служит и резкое нарушение динамического равновесия земных недр на уровне нижней коры и мантии, которое установлено по данным глубинного зондирования и изучения глубинных ксенолитов — минеральных и породных включений, хранящих следы глубинного происхождения. Активизация мантии связана с разогревом вещества и, как следствие, его разуплотнением, увеличением объема и подъемом горячих горных масс в верхние горизонты Земли. Данный механизм подтвержден, в частности, усилением вулканической деятельности на Армянском нагорье.

Живая тектоника

Кавказ не всегда представлял собой систему горных гряд. Формирование рельефа началось в олигоцене (40—35 млн лет тому назад). Однако до рубежа примерно 25 млн лет скорость поднятия была невелика и короткие фазы вздымания чередовались с периодами затишья и срезания рельефа. В эти периоды образовывались так называемые поверхности выравнивания — плоские денудационные равнины, или пенеплены. Изучение их последующей деформации позволяет геологам реконструировать стиль и интенсивность тектонических движений. Первая (исходная) поверхность выравнивания сформировалась 13—12 млн лет назад и охватила современные водораздельные пространства Большого и Малого Кавказа. Сегодня участки, сохранившиеся от размыва и разрушения, находятся на большой высоте. Им, возможно, соответствует современный уровень высочайших вершин Главного хребта: «В Ставрополе увидел я на краю неба облака... Это снежные вершины Кавказской цепи» (А.С.Пушкин). Поднятие достигло кульминации в среднем плиоцене (3.5 млн лет назад). Центральная часть Большого Кавказа располагалась на 2—2.5 км, а Малого — на 1.5 км над ур.м. Скорость подъема горного сооружения намного превышала ско-

рость его разрушения. В результате сформировались глубокие врезы, по которым неслись горные потоки и реки.

Затем, после непродолжительной тектонической паузы, снова проявились активные движения земной коры, продолжающиеся вплоть до нашего времени. Подъем горных массивов до высот более 4—5 тыс. м приводил к многократным оледенениям, следы которых мы наблюдаем и сейчас в центральной части «чеканки серебряных гор» (Г.Абашидзе) Главного Кавказского хребта.

Скорость роста Кавказских гор оценивается специалистами в 1—3 мм/год, но местами она достигает 10—16 мм/год. В новейшее время продолжается формирование структурного плана Кавказа. Один из примеров «живой» тектоники — активизация разломов и складок земной коры. В прибрежной зоне оз.Севан с пробуждением Арцвакского разлома связано образование молодого вулканического конуса. К глубинным разломам приурочены извержения грязевых вулканов Куринской впадины и Прикаспия; к системе крупных широтных нарушений — выходы углекислых минеральных вод.

Само наличие расчлененного горного рельефа представляет существенную опасность для человека — образуются гигантские оползни и сели (грязево-каменные потоки) необычайной мощности, а также происходит катастрофически быстрое продвижение ледников. Они сносят на своем пути все: лесные массивы, мосты, селения... и приносят неисчислимые бедствия. Зачастую эти явления непосредственно связаны с сейсмическими событиями.

Для Кавказа, как и для всего Альпийско-Гималайского пояса, свойственны не только вертикальные движения горных масс, но и латеральные (в горизонтальном направлении) перемещения отдельных плит и блоков. Один из наиболее ощутимых признаков современной активности Кавказа — землетрясения, связь которых с тектоническими нарушениями бесспорна. В целом Кавказ находится в зоне 6—7-балльных землетрясений, но отмечены и 8—9-балльные. К катастрофическим последствиям, с огромными разрушениями и человеческими жертвами, привели Ахалкалакское (1899), Шемахинское (1902), Зангезурское (1913), Ленинанканское (1926) землетрясения. Одной из последних природных катастроф, унесших многие тысячи человеческих жизней, было Спитакское землетрясение 1988 г. в Армении. По оценкам специалистов, оно достигало 9 баллов и было обусловлено движением по крупному разлому земной коры, которое активизировалось в результате общего субмеридионального укорочения (сжатия) территории. При этом осмотр российскими и армянскими геологами расположенного в зоне бедствия пещерного монастыря XI—XII вв. обнаружил трещины, связанные с более ранними событиями подобного рода.



Тырныауз после схода селевого потока.

Фото Т.Ю.Тверетиновой

Сейсмическая активность проявляется неравномерно. Практически все Предкавказье и вся западная половина Большого Кавказа относятся к шестибалльной зоне, за исключением Минераловодского и Сочинского районов (семибалльная зона). Семибалльная зона охватывает Закавказье. Еще более высокой активностью (7–8 баллов) отличаются Восточный Кавказ, Ахалкалакское вулканическое нагорье, массив Арагац, Юго-Восточный Зангезур, районы к западу от Махачкалы (Дагестанский клин), Приереванский и Шемахи. Очаги землетрясений, как правило, расположены на глубинах 5–20 км и приурочены к крупным разломам, подвижки по которым и провоцируют выделение из земных недр огромной энергии. Кавказ и сейчас живет интенсивной тектонической жизнью.

Полезные ископаемые

Обратим теперь внимание на прикладные аспекты геологии Кавказа — природной кладовой, наполненной разнообразными минеральными ресурсами: рудным и нерудным сырьем, минеральными водами, драгоценными, полудрагоценными и поделочными камнями.

Полезные ископаемые эндогенного происхождения. Это в первую очередь медноколчеданные месторождения Кафан, Чирагидзор, Кедабек, Алаверди, а также некоторые рудопроявления Большого Кавказа. Широко известны полиметаллические свинцово-цинковые месторождения (Садонское на Северном Кавказе и Дамблудское в Южной Грузии). Железные руды представлены магнетитами Дашкесана, который славится и своими кобальтовыми запасами. Вдоль северного окраинного пояса Грузинской глыбы расположена полоса баритовополиметаллических проявлений, а в верхней части Южного склона Большого Кавказа, вдоль основных линий тектонических разрывов, протягиваются пояса горных пород, со-

держащих мышьяк, сурьму, вольфрам, молибден, ртуть.

С мощной системой разломов связан наиболее протяженный (более 700 км) пояс месторождений киновари (HgS), который прослеживается от р.Шахе на западе, через верховья р.Бзыбь в Осетию, а затем на территорию Южного Дагестана. На северном склоне Большого Кавказа наиболее известно вольфраммолибденовое Тырныаузское месторождение, связанное с молодыми гранитными массивами. На Малом Кавказе, в пределах Севано-Акеринского офиолитового пояса, находятся залежи хромита (Шорджа и др.). Важное значение (мирового масштаба!) имеют медно-молибденовые месторождения Западного Зангезура (Дастакерт, Каджаран, Агарак, Парагачай и др.). Отмечены небольшие рудопроявления молибдена в верховьях р.Тертер, а также золотоносные жилы юго-восточной части бассейна оз.Севан. В целом же нужно отметить, что на Кавказе собрана почти вся таблица Менделеева.

Осадочные полезные ископаемые. К этой категории прежде всего относятся нефть, газ и уголь. Каменным углем Кавказ не богат. Наибольшее значение имеют месторождения Западной Грузии (Тквибульско-Гелатский и Ткварчельский районы), руды которых используются металлургическим заводом в Рустави. Небольшие угольные залежи известны на северном склоне Центрального Кавказа, а также в нижнеюрских отложениях Кубани, Баксана и Южного Дагестана. Разрабатываются бурые угли озерного происхождения в Ахалцихском бассейне Грузии и в Армении (Джаджур, Мегри и др.).

А что касается нефти и газа — то тут Кавказ занимает одно из ведущих мест в мире как по разведанным и потенциальным запасам, так и по объемам добычи, и особенно по необычайно высокому качеству сырой нефти. Промышленные нефтегазоносные месторождения объединены в три крупные провинции: Азово-Кубанскую, Терско-

Среднекаспийскую и Куринско-Южнокаспийскую. Последняя — наиболее богатая. Здесь сосредоточены крупнейшие залежи. По образному выражению В. Брюсова, «гордо стоят нефтяные столпы» Апшеронского п-ова и Апшеронского архипелага (Нефтяные Камни и др.), а также Юго-Восточного Кобыстана и Нижнекуринской впадины. «Выходит нефть... из ноздреватой почвы Апшерона» (В. Луговской).

Кроме угля, нефти и газа на Кавказе обнаружены осадочные марганцевые и железные руды. В частности, одно из крупнейших месторождений марганца в мире — Чиатурское в Грузии. Относительно крупные залежи природно-легированных железных руд известны в долине р. Малки в Кабардино-Балкарии. На северном склоне Большого Кавказа найдены скопления конкреций железа, однако концентрация железа в них невелика и редко достигает промышленных значений.

Нерудное минеральное сырье. Природные строительные и отделочные материалы — одно из главных богатств Кавказского региона. Мировую известность имеют вулканические туфы и туфолавы Армении (особенно знаменитый розовый арктикский туф), а также сходные по составу и структуре породы в окрестностях г. Налчика. Широко применяются в строительстве и облицовочном деле светло-желтые туфы (болнисский, колагеранский) Юго-восточной Грузии и Северной Армении. О красоте кавказских мраморов ходят легенды. Это серый лопотский и красный шрошинский — в Грузии, розоватый агверанский и черный давалинский — в Армении. А сколько зданий облицовано апшеронскими известняками-ракушечниками из окрестностей Баку! Достояние Кавказского региона и мергели-натуралы из флишевых отложений Новоросска. Они идут на изготовление первоклассного цемента. Отбеливающие бентонитовые глины Грузии, сырье для каменного литья из Боржомского ущелья, каменная соль Нахичеванской впадины и Ереванского прогиба дополняют наш далеко не полный перечень природных богатств Кавказа.

Минеральные воды. Они отличаются удивительным разнообразием состава и представляют едва ли не самую большую ценность Кавказских гор. «Захочешь пить — там есть вода такая... Арзни, хорошая, колючая, сухая и самая правдивая» (О. Мандельштам). И так можно сказать практически обо всех водах Кавказа, а многие из них (как, например, Боржоми) не имеют аналогов в мире по составу и лечебным свойствам. Запасы подземных минеральных растворов огромны и, по подсчетам специалистов, их суммарный дебит составляет 250 000 м³/сут.

Центральный Кавказ славится сульфатно-гидрокарбонатными водами — «нарзанами» Кисловодска, хлоридно-гидрокарбонатными водами — «эссентуками», многочисленными углекислыми водами Приэльбрусья, Горной Осетии и др. В Ольгинском, Геленджикском и Новороссийском районах сосредоточены источники гидрокарбонатно-натриевых вод, газированных метаном и азотом. На южном склоне Главного хребта расположены содовые термальные воды 45—47°С, с азотом и повышенным содержанием гелия. Зона сероводородных сульфатных вод Северного Кавказа приурочена к мезозойским известнякам и протягивается от Адыгеи до Дагестана. Здесь находятся известные на весь мир курорты района Кавказских минеральных вод — Эссентуки, Пятигорск, Железноводск. Сероводородные хлоридно-натриевые воды имеют ограниченное распространение, но характеризуются неповторимым набором минеральных компонентов и лечебных свойств. К этому типу принадлежат источники Мацесты и Цхалтубо, Ткварчели, Скури и некоторые другие. Малый Кавказ славится широким развитием азотных терм, связанных с областью проявления молодого вулканизма. Из наиболее известных месторождений отметим минерализованные растворы Аджаро-Триалетской (Боржоми) и Севанской (Дилижан) зон, термы карловарского типа (Джермук в Армении и Истису в Азербайджане), а также воды, обогащенные литием, мышьяком, бором (Джюльфа). Периферический пояс метановых вод располагается прерывистым кольцом вокруг всего горного сооружения Большого Кавказа. Обычно это связано с нефтяными месторождениями Предкавказья и Куринской впадины (сероводородные воды Талги в предгорьях Дагестана, источники Серноводска и др.).

* * *

Вот и все! К сожалению, столь краткий очерк не позволяет обратиться к рассмотрению еще очень многих аспектов геологии Кавказа. Он лишь отправная точка для тех, кто захочет глубже окунуться в сложный и привлекательный мир гор. Во всяком случае можно надеяться, что «Кавказ нас принял в свое святилище!» (А. С. Пушкин) и не возникло пока еще желания воскликнуть: «Хочу домой! Меня уж затошнило от этих гор, то синих как чернила, то белых как асбест... Хочу в иную, плоскостную зону, хочу в Москву, к родному телефону» (В. Инбер). ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 02-05-64477.

Протеасома: разрушение во имя созидания

Е.Б.Абрамова, В.Л.Карпов

Известно, что в живой клетке содержатся множество разных белков. Одни из них существуют довольно долго, другие живут от нескольких минут до 2–3 ч. Последние синтезируются только в определенный момент жизни клетки, в ответ на некоторые внутренние и внешние импульсы. Когда потребность в таком белке отпадает, специальные факторы сигнализируют о том, что его синтез должен быть остановлен. Действуют они или на этапе считывания матричных РНК (мРНК) с ДНК (факторы транскрипции), или на стадии синтеза белка с уже имеющихся РНК-матриц. Однако, если некий белок существует, но в его функционировании клетка больше не нуждается, должен быть и механизм, обеспечивающий остановку его работы. Такой механизм давно и весьма детально исследован для белков-ферментов. Чтобы «вывести из строя» фермент, его активность обратимо подавляется (ингибируется) веществами белковой или небелковой природы. Однако клетка на протяжении своей жизни синтезирует и множество белков, не обладающих ферментативной активностью, но тем не менее «исполняющих» разнообразные роли. Такие белки не



Елена Борисовна Абрамова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института биологии развития им.Н.К.Кольцова РАН. Область научных интересов — репликация и репарация ДНК, механизмы функционирования ДНК-полимераз в онтогенезе, роль протеасомы в процессах, обеспечивающих репарацию ДНК.



Вадим Львович Карпов, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией Института молекулярной биологии им.В.А.Энгельгардта РАН. Занимается изучением структуры и функции хроматина, роли ДНК-белковых взаимодействий в регуляции генной активности, в том числе генов протеасомы.

только прекращают свою работу в определенный момент, но и существуют очень недолго (потому и называются короткоживущими) по сравнению со временем жизни клетки. Очевидно, что каким-то образом должны удаляться и «сделавшие свое дело» белки, иначе они переполнят клетку и разрушат ее. Может быть, она справляется с ними посредством хорошо

изученного протеолиза (распада белков под действием специальных ферментов)? Но тогда неясно, почему не повреждаются при этом структурные компоненты клетки и еще нужные ей белки. Протеолиз в лизосомах — процесс неспецифический, в этих образованных мембраной «мешочках» с набором ферментов гидролаз молекулы белков расщепляются до аминокислот.

© Е.Б.Абрамова, В.Л.Карпов

кислот, идущих затем в обменные процессы клетки (здесь же гидролизуются нуклеиновые кислоты и полисахариды). У высших эвкариот лизосомы разрушают только белки, связанные с мембранами, а также чужеродные, захваченные во время эндоцитоза (например, вирусные или бактериальные).

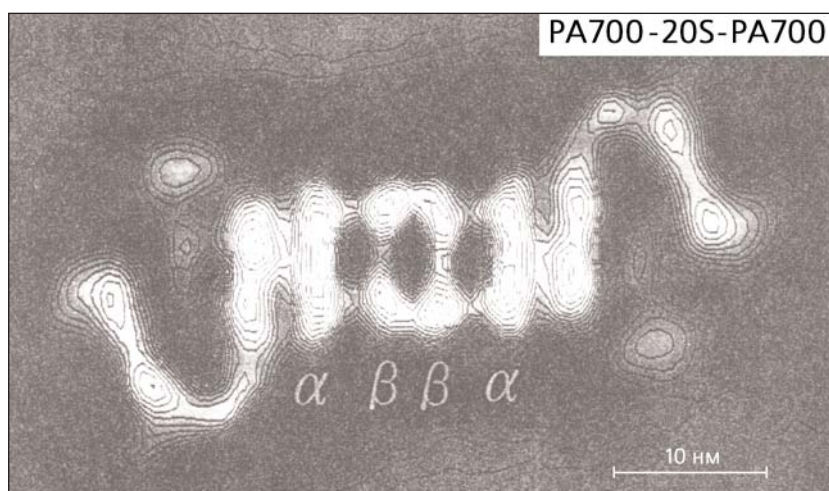
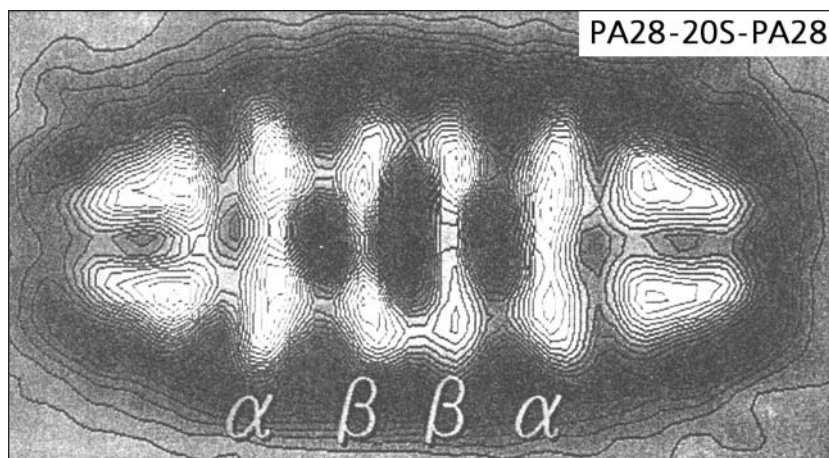
К началу 80-х стало ясно, что эффективная регуляция не только количества, но и функции многих белков зависит и от процессов, связанных с деградацией.

Многоликие частицы

В это же время в клетке был обнаружен высокомолекулярный белковый комплекс, который работал в определенных условиях как несколько протеолитических ферментов [1]. Однако, что очень важно, свою разрушающую активность комплекс проявлял только в явно нефизиологических условиях под действием изменяющих его структуру веществ. Он был найден в клетках как самых примитивных, так и высших эвкариот, причем и в ядре, и в цитоплазме. Это свидетельствовало об абсолютной необходимости комплекса для нормальной жизнедеятельности клетки.

Его начали интенсивно изучать во многих лабораториях мира, и даже возникло множество названий, из которых сейчас чаще всего используется то, что дали К.Танака и А.Голдберг, — протеасома, т.е. частица (сома) с протеолитической функцией [2]. Надо сказать, что протеасомой названы две частицы разной сложности строения. Они отличаются также молекулярной массой и коэффициентом седиментации (его выражают в единицах Сведберга и обозначают буквой S при числе).

В 90-х годах выяснилось, что первоначально выделенный комплекс с молекулярной массой около 700 кДа и коэффициентом седиментации 20S в каче-



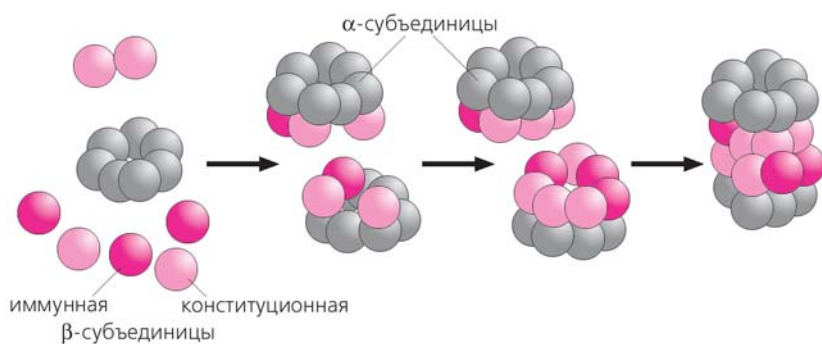
Компьютерная томография двух форм протеасомы [8].

стве протеолитического ядра входит в состав более сложной частицы. Первую стали называть 20S протеасомой, вторую — 26S протеасомой.

Затем обе частицы были выделены в очищенном виде, проведен рентгеноструктурный анализ 20S протеасомы, а методами электронной микроскопии и компьютерной томографии получены «портреты» и этой, и другой частицы. Судя по рентгеноструктурным данным, 20S протеасома представляет собой полый цилиндр длиной 15–17 нм и диаметром 11–12 нм, образованный четырьмя лежащими друг на друге кольцами. Каждое из них состоит из семи белковых субъединиц (молекулярной массой 20–35 кДа),

причем периферические кольца сформированы субъединицами α -типа, а два центральных — β -типа.

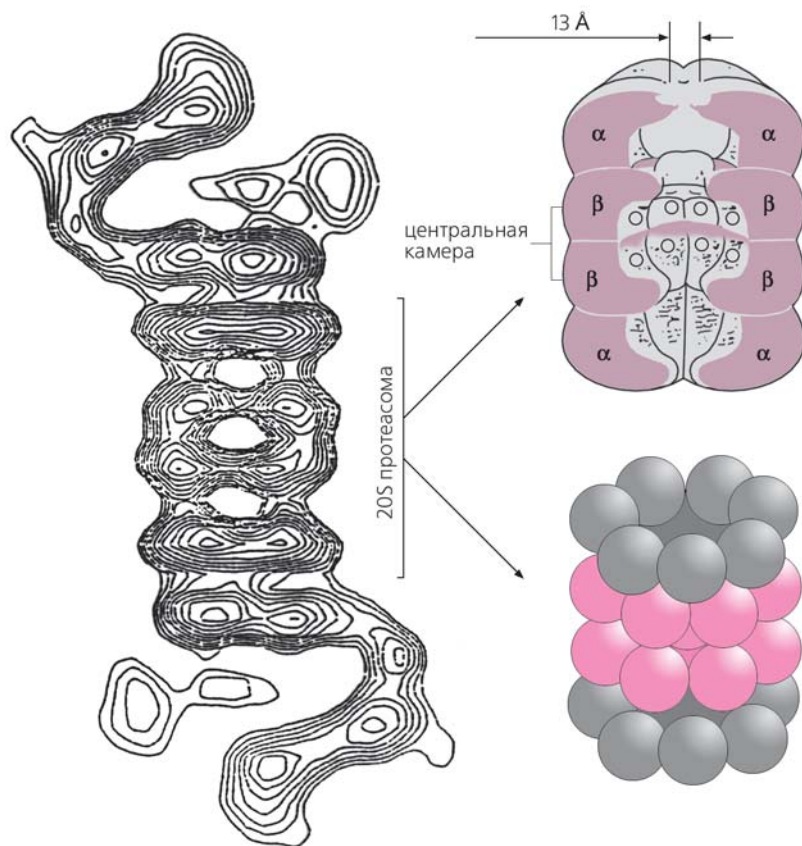
Канал внутри цилиндра, расширяясь, образует три камеры: большую центральную и две меньшие, по краям. В центральной камере и осуществляется протеолиз. Роль α - и β -колец в работе протеасомы различна. Так, субъединицы α -кольца за счет своих гидрофобных участков закрывают отверстие в центральной камере и препятствуют случайному проникновению белков в протеолитическую камеру. Кроме того, эти же субъединицы отвечают за присоединение других высокомолекулярных комплексов, которые регулируют работу 20S протеасомы.



Сборка 20S протеасомы.

Как возникает столь непростая конструкция? Сначала автокаталитически образуется семичленное кольцо из α -субъединиц. Затем во взаимодействии с ним вступают три β -субъединицы, одна из которых несет так называемый лидерный пептид, работающий как шаперон

(Этот полипептид-помощник «следит» за правильностью укладки белковой молекулы). Три первых β -субъединицы определяют посадку остальных, и в результате образуется 13S комплекс из двух разноименных колец. После димеризации 13S комплекса возникает 16S пред-



Схематическое строение 26S протеасомы и протеолитических камер.

шественник из четырех колец, а «зрелая» 20S протеасома — после автокаталитического отщепления лидерного пептида и высвобождения N-концевого треонина, играющего важнейшую роль в формировании каталитических центров.

Мы упоминали, что центральная камера — это место, где происходит протеолиз. Именно там, на внутренней поверхности, располагаются каталитические центры — три основных и два дополнительных. Один из основных катализирует протеолиз по типу химотрипсина, другой — подобно трипсину, третий работает по принципу кэспазы. Эти основные области локализованы на трех разных субъединицах каждого β -кольца, там же находятся и дополнительные. Структура активного центра β -субъединиц необычна: как упоминалось, в качестве основного структурного элемента, проводящего катализ, в нем присутствует N-концевой треонин.

Отверстие, ведущее в центральный канал и образованное α -субъединицами 20S протеасомы, по размеру сопоставимо с α -спиралью белка, а кроме того оно закрыто их гидрофобными N-концевыми участками. Это и не позволяет цитоплазматическим белкам проникать к месту возможного разрушения. Поэтому 20S протеасома, выделенная в условиях, сохраняющих ее целостность, гидролизует только короткие полипептиды в реакции, которая не требует АТФ как источника энергии. Но ведь мы говорили, что главная забота 20S протеасомы — расщепление не пептидов, а белков. Как же они проникают в каталитические области, если вход закрыт?

Все выяснилось: если использовать агенты, способные влиять на структуру 20S протеасомы, протеолитическая активность увеличивается, так как отверстие в α -кольце, ведущее в центральный канал, расширяется (об этом свидетельствуют последние рентгеноструктур-

ные данные). В эксперименте такое расширение происходит в нефизиологических условиях, под влиянием низкомолекулярных веществ, а в клетке роль «открывалок» выполняют макромолекулярные регуляторы (активаторы) весьма сложного строения. Пока их известно только два — PA700 и PA28 (аббревиатура англ. Protein Activator). На протеолитическую активность 20S протеасомы они влияют по-разному.

Благодаря первому регулятору (PA700) она участвует в деградации основной массы клеточных белков. Формирующие его 17—18 субъединиц гетерогенны по молекулярной массе, аминокислотной последовательности и третичной структуре. В составе этого комплекса можно выделить два структурных элемента, тоже отнюдь непростых. В англоязычной литературе их называют base- и lid-complexes, что по-русски можно передать как нижний и верхний комплексы. Так вот, нижний (базовый, опорный) присоединяется к α -кольцу протеолитического ядра и открывает белковым субстратам доступ в каталитическую камеру. Этот элемент регулятора состоит из девяти субъединиц, причем шесть — это ферменты, гидролизующие АТФ, т.е. они поставляют энергию, необходимую на ряде этапов деградации белков. Верхний элемент построен из восьми субъединиц, отвечающих за распознавание и подготовку белковых субстратов к расщеплению, за взаимодействие с некоторыми другими клеточными белками.

Регулятор PA700 присоединяется к обоим концам протеолитического ядра-цилиндра (эта реакция также нуждается в энергии, ее источником служит АТФ) и образует зеркально симметричную структуру, похожую на гантели.

Каталитическое ядро (т.е. 20S протеасома), связанное с двумя регуляторами PA700, и есть 26S протеасома, ее молекулярная масса составляет более 2.5 МДа.

Этот комплекс обозначают и как PA700-20S-PA700.

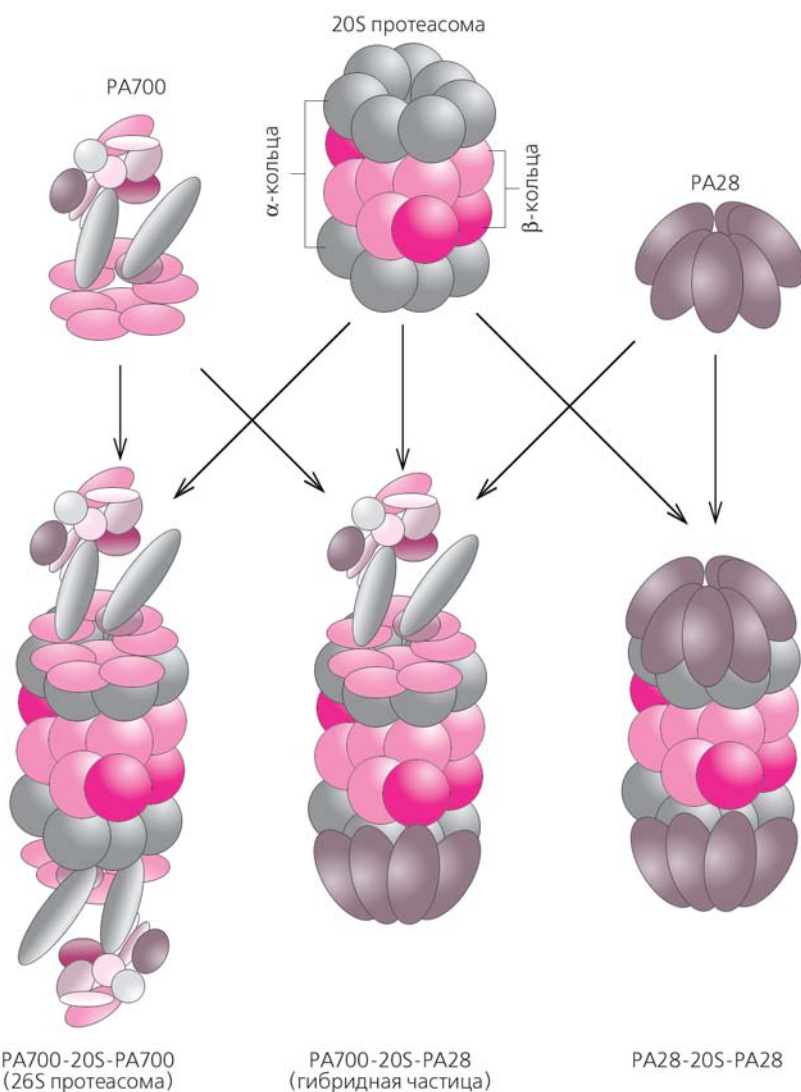
Другой регулятор, PA28, тоже состоящий из нескольких субъединиц, подобно PA700, способен присоединяться к концам протеолитического ядра-цилиндра с образованием частиц PA28-20S-PA28. За счет этого канал в α -кольце ядра открывается, но гидролиз белков не идет, расщепляются только короткие полипептиды.

Заметим, что с 20S протеасомой могут связаться и оба регулятора сразу, тогда возникает гибридная форма PA700-20S-PA28. Как будут распределены разные формы и в каком количестве по-

надобятся клетке, зависит от ее молекулярных потребностей в определенное время ее жизни и в конкретных обстоятельствах. Об этом мы еще расскажем, а сейчас вернемся к 26S протеасоме, вернее, к ее субстратам — белкам.

Необходим ярлык

Итак, молекулярная машина собрана и готова работать — разрушать отработавшие белки, чтобы клетка не только не заполнилась ими до отказа, но и использовала белковые осколки для своих целей.



Различные формы протеасомы и ее активаторов.

У млекопитающих до 90% клеточных белков (не только всех короткоживущих, но и большинства долгоживущих) подвергается гидролизу в полости протеасомы. Однако, прежде чем начнется этот процесс, она должна распознать объект протеолиза по какому-то признаку, ярлыку. Оказалось, маркировкой занимается специальная система ферментов (ее называют системой убиквитинирования). Маркером же служит цепочка не менее чем из четырех молекул белка убиквитина, состоящего из 76 аминокислотных остатков. Как образование цепочки через остаток лизина-48 в каждой молекуле, так и присоединение ее к белку-субстрату как раз и обслуживается системой ферментов.

Эта система, включающая три типа ферментов (E1, E2 и E3), высоко специфична и избирательна за счет того, что построена по принципу иерархического усложнения. Фермент E1 (в клетке он только один) активирует молекулу убиквитина и передает ее одному из ферментов семейства E2 (их называют конъюгирующими). Затем в каскад реакций вступает третий участник — представитель семейства E3, лигаз, «сшивающих» ферментов. Он принимает убиквитин от E2, соединяется с белком-субстратом и ковалентно пришивает к нему цепочку убиквитина.

Если E1 не имеет разновидностей, то семейство E2 насчитывает 13 членов в клетке дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*,

а млекопитающих — гораздо больше. В семействе E3 сейчас известно около 100 разных лигаз, они-то и определяют в конечном счете высокую специфичность всей протеолитической системы. А вообще каждый фермент и того, и другого семейства участвует в определенном клеточном процессе.

Маркировка белка-субстрата (мишени) цепочкой убиквитина завершилась. Теперь ее узнает и связывается с ней одна или более субъединиц регулятора PA700. Этот процесс, как и последующее разворачивание субстрата, нуждается в энергии, которую поставляют, видимо, АТФазы базового (нижнего) элемента в структуре того же регулятора. Развернутая, линейная молекула белка протягивается через регулятор, играющий роль рта протеасомы, и через открытое отверстие в α -кольце проникает в протеолитическую камеру. Здесь белок расщепляется на полипептиды длиной от 5 до 24 аминокислотных остатков, которые высвобождаются из протеасомы и в цитоплазме могут подвергнуться гидролизу до аминокислот протеазами (например, эндопептидазами). Ненужная больше маркировочная цепочка ликвидируется: изопептидазы разрывают ее на мономеры.

Описывая каскад реакций по маркировке субстрата, мы, чтобы не разбивать ход событий, намеренно кое-что опустили. Не сказали, почему цепочка убиквитина пришивается именно к тому белку, чья судьба предопределена. Оказывается, он уже несет признаки смерти — специфические сигналы, которые включают процесс деградации. Ими могут быть участки внутри белковой молекулы или на ее N-конце. Видимо, в определенных условиях они становятся доступными для узнавания ферментной системой, ответственной за маркировку.

Некоторые N-концевые аминокислотные остатки (у эвкариот, особенно Арг, Лиз, Лей, Фен, Асп) играют большую роль в оп-

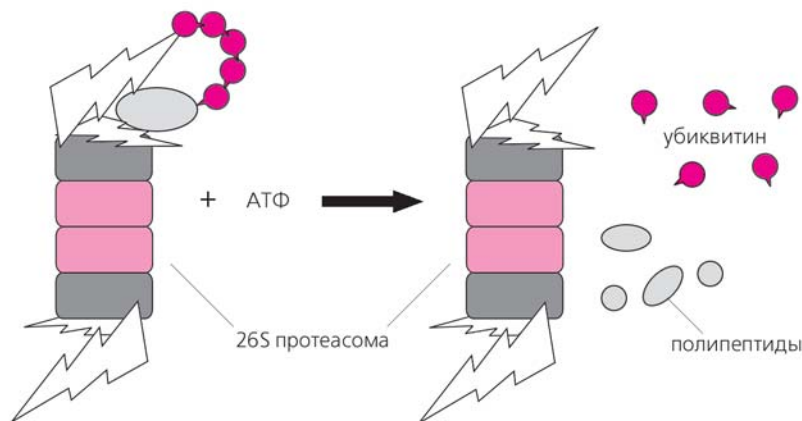
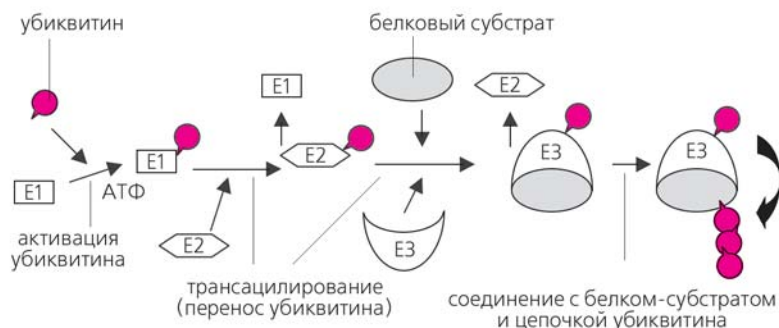


Схема протеасомной деградации белков. Вверху — образование убиквитиновой цепочки; внизу — гидролиз субстрата протеасомой до пептидов и свободного убиквитина.

Таблица

Некоторые субстраты, расщепляемые 26S протеасомой, и их роль в клетке

Субстрат	Физиологическая роль в клетке
Факторы транскрипции	
NF-κB - p105 (предшественник p50), IκB (ингибитор NF-κB)	Иммунный и воспалительный ответ
MyoD	Тканеспецифичный активатор транскрипции при дифференцировке скелетных мышц
Rpn4	Активатор транскрипции генов протеасомы
Регуляторы клеточного цикла	
CLN1, CLN2, CLN3	Регуляция G1-фазы клеточного цикла у дрожжей
Sic1	Ингибитор CDK S-фазы (задержка в G1-фазе)
Cyclin D1	Контроль перехода к S-фазе у высших эвкариот
p27 ^{Kip1}	Ингибитор CDK S-фазы (остановка в G1-фазе)
Cyclin A, cyclin B	Регуляция митоза
Cdc6	Компонент пререпликативного комплекса
Cyclin E	Поддержание кариотипа и нормального клеточного гомеостаза
Онкобелки и белки-супрессоры опухолей	
c-Jun	Активатор транскрипции (клеточный рост и дифференцировка)
c-Fos	Клеточный рост, дифференцировка и трансформация
c-Mos	Ключевой регулятор клеточного цикла
p53	Соотношение процессов роста и апоптоза, супрессия опухолей
Ферменты:	
РНК полимеразы II (большая субъединица)	Репарация ДНК
Орнитиндекарбоксилаза	Ключевой фермент биосинтеза полиаминов
Фруктозо-1,6-дифосфатаза	Обмен гликогена, ключевой фермент глюконеогенеза

ределении жизни многих короткоживущих белков (в среднем они существуют от нескольких минут до трех часов), а также частично разрушенных или с измененной третичной структурой. На зависимость скорости деградации от природы N-концевых аминокислот (правило N-конца) первым обратил внимание наш бывший соотечественник А. Варшавский, он же ввел понятие «короткоживущие белки» [3]. В ряде случаев дестабилизирующие аминокислоты присоединяются к N-концу долгоживущих белков специфическими ферментами, после чего такие белки быстро разрушаются протеасомой.

Цепочка убиквитина способна присоединяться к белку-мишени и по сигналам, возникающим за счет некоторых вторичных модификаций (например, фосфорилирования) или соединения со вспомогательными белками.

В общих чертах мы рассмотрели всю схему (именно схему, потому что очень многие подробности остались за ее пределами)

строения и сборки протеасомы, систему маркировки белка, который будет ею разрушен до полипептидов. За счет этого протеасома регулирует время жизни важнейших белков, удаляет из нее чужеродные и аномальные, поставившие образованные в результате гидролиза полипептиды в качестве антигенов, способных сообщать иммунной системе о неполадках в клетке. Таким образом, внутриклеточный протеолиз — это не механический процесс деградации белков, а один из основных факторов, которые регулируют жизнедеятельность клетки.

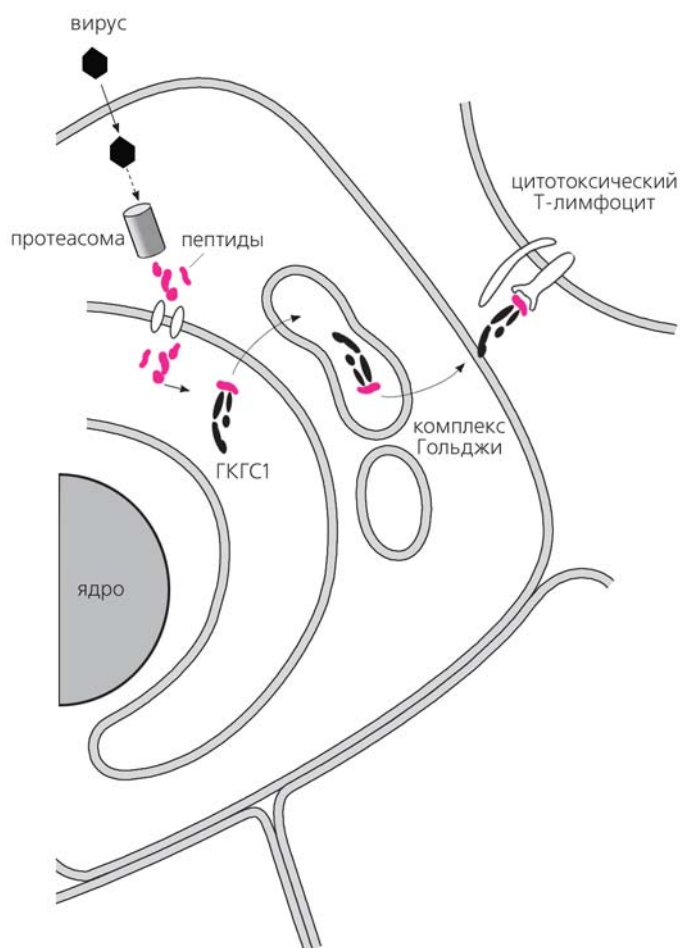
Из разнообразных процессов, в которых участвует протеасома (табл.), рассмотрим лишь некоторые.

Участница множества процессов

Отметим прежде всего, что при изучении роли протеасомной деградации в различных клеточных процессах весь-

ма часто использовались ингибиторы активности протеасомы. Они легко проникают в клетку и избирательно подавляют данный путь протеолиза [4].

Регуляция клеточного цикла. Как известно, клеточный цикл состоит из нескольких фаз, а их последовательная смена регулируется белками циклинами. Поскольку на каждой фазе действует собственный регулятор, жизнь его должна быть короткой. Это и обеспечивает 26S протеасома. Оказалось, что одни циклины в качестве метки для узнавания содержат участки, обогащенные пролином, глутаминовой кислотой, серином и треонином, а ряд других — консервативный фрагмент из девяти аминокислот, который обычно располагается на расстоянии около 40 аминокислотных остатков от N-конца. Узнанный по той или иной метке регуляторный белок сшивается, как уже было сказано, с убиквитиновой цепочкой своим собственным ферментом



Образование иммуногенных пептидов за счет расщепления вирусного белка протеасомой и их вынос на поверхность клетки в качестве антигенов. Весь путь пептидов показан цветом. Клетка с такими антигенами на поверхности узнается цитотоксическими лимфоцитами и разрушается ими. ГКГС1 — главный комплекс гистосовместимости, молекулы класса I.

из семейства E3 и разрушается 26S протеасомой. Ясно, что сбой в ее работе вызовет остановку клеточного цикла на той или иной фазе.

Злокачественное перерождение клетки. В нормальной здоровой клетке белки, регулирующие скорость транскрипции, во многих случаях определяют ее дальнейшую судьбу — станет ли работать и делиться с запрограммированной для нее скоростью, пойдет ли по пути неконтролируемого злокачественного роста, будет ли разрушена как представляющая

опасность. Поэтому такие регуляторные белки в зависимости от обстоятельств могут быть или онкобелками, или же, наоборот, онкосупрессорами. Пример подобных превращений — белок p53, уровнем которого поддерживается в здоровой клетке соотношение между процессами роста и апоптоза. Но все меняется, например, при заражении человека вирусом папилломы: вирусный белок E6 находит белок p53 и сигнализирует строго определенному ферменту из семейства E3 о необходимости присоединить

к p53 убиквитиновую цепочку. Фермент выполняет свою функцию, и p53 становится субстратом для протеасомной деградации. В результате его ускоренного разрушения клетка идет по пути злокачественного перерождения.

Транскрипция. Мы говорили, что под действием 26S протеасомы расщепляются белковые молекулы. Однако выяснилось, что протеолизу может подвергаться даже отдельная субъединица в сложном белковом комплексе. Представить себе механизм взаимодействия с ним 26S частицы довольно трудно. Тем не менее частичный протеолиз осуществляется в процессе двухступенчатой активации ядерного фактора (его обозначают NF-κB), который контролирует транскрипцию. Сначала в результате гидролиза протеасомой образуется из своего предшественника субъединица p50 этого фактора. Затем она, еще одна субъединица — p65 — и белок-ингибитор IκB объединяются в неактивный комплекс. Транскрипция становится возможной после деградации 26S протеасомой ингибитора IκB, перед этим фосфорилированного в двух местах.

Иммунная система. Участие протеасомы в иммунном ответе клетки — один из наиболее активно изучаемых аспектов работы 26S частицы. Она, гидролизуя аномальные или чужеродные белки до полипептидов, составляет некоторые из них (обычно длиной от восьми до 11 аминокислот) в качестве антигенов [5]. Такие полипептиды соединяются в цитозоле с определенным транспортным белком и переносятся в эндоплазматический ретикулум, где взаимодействуют с молекулами белков класса I главного комплекса гистосовместимости и выносятся на поверхность клетки. Вновь появившиеся антигены иммунная система обнаруживает с помощью цитотоксических Т-лимфоцитов и разрушает клетки, в которых продуцируются ви-

русные или другие необычные для них белки.

Чтобы эффективнее защитить организм от опасных для него клеток с синтезирующимися в них аномальными белками, в каталитическом ядре протеасомы три конституционные β -субъединицы могут быть заменены на их изоформы, или иммунные субъединицы. В культуре клеток млекопитающих такая замена происходит под действием γ -интерферона — мощного иммуномодулятора. В лимфоидных органах (селезенке, тимусе, лимфатических узлах) изоформы синтезируются постоянно, причем их количественное соотношение с конституционными субъединицами зависит и от типа ткани, и от стадии дифференцировки органа. В результате подобной модификации количество образующихся протеасомой полипептидов — потенциальных антигенов — возрастает в несколько раз. Но это не единственный способ, посредством которого активизируется работа протеасомы в качестве генератора антигенных полипептидов.

Мы упоминали, что существуют три формы протеасомы (в зависимости от того, с каким регулятором связано ее ядро): PA700-20S-PA700, т.е. 26S форма, PA28-20S-PA28 и гибридная PA700-20S-PA28. Предполагают, что вторая форма способна гидролизовать длинные пептиды — первоначальный продукт расщепления белков 26S протеасомой — до коротких. Именно они и выносятся на поверхность клетки в качестве антигенов. Что касается гибридной формы, то один ее регулятор (PA700), видимо, узнает белок, несущий убиквитиновую цепочку, а второй (PA28) заставляет каталитическое ядро гидролизовать белковую молекулу до более коротких иммуногенных пептидов. К настоящему времени установлено, что содержание и внутриклеточное распределение форм протеасомы связано с действием γ -интерферона и что в цито-

плазме одновременно с уменьшением количества 26S протеасомы накапливается гибридная форма.

Термозащита. При нагревании, как известно, белки утрачивают нормальную конфигурацию и перестают выполнять свои функции. Чтобы защитить клетку от столь пагубных последствий, в ней синтезируются белки теплового шока, или шапероны. Они исправляют нарушенную высокой температурой форму белковых цепей. В каком качестве участвует в этом процессе протеасома, пока не совсем ясно. Однако установлено, что, если подавить ее активность, в клетке накапливаются поврежденные белки, но в то же время стимулируется синтез мРНК шаперонов. Повышается также и уровень трегалозы (молекулы-термозащитницы) и термостабильность клеток в целом. Следовательно, полагают, ингибиторы протеасомы могут найти применение в медицине в качестве терапевтических средств при шоковых воздействиях высокими температурами.

Апоптоз. Запрограммированная клеточная смерть — один из важнейших защитных процессов, который обеспечивает контроль за количеством клеток и постоянством состава тканей в организме. Таким способом разрушаются и опасные для него клетки: зараженные вирусами, раковые, с нарушенной ДНК. Механизмы апоптоза очень консервативны, одинаковы у низших эвкариот и млекопитающих и представляют собой сложную систему последовательных молекулярных событий, которые в конечном счете приводят к энзиматической фрагментации хромосомной ДНК и смерти клетки. И хотя в апоптозе работают свои специфические протеазы (каспазы), исследователи обнаружили, что процесс связан и с протеасомной деградацией белков.

Эту отнюдь не простую связь изучают в основном с помощью ингибиторов активности про-

теасомы, и интенсивнее всего в исследованиях онкогенеза. Оказалось, что, снижая уровень активности упомянутого уже ядерного фактора транскрипции (NF- κ B), такие ингибиторы могут запускать апоптоз трансформированных клеток, предотвращать ангиогенез (разрастание кровеносных капилляров в раковой ткани) и метастазирование *in vivo*. Это результат того, что снижение каталитической активности протеасомы приводит к накоплению ингибиторов роста клетки и проапоптозных белков. Не разрушенные ингибированной протеасомой короткоживущие белки, такие как p53 и p27, тоже способны запустить в клетке каскад биохимических и морфологических событий, ведущих к апоптозу. Однако ингибиторы протеасомы могут и предотвращать его, например в первичных клеточных культурах, если он вызван какими-то другими стимулами.

Как видно из приведенных примеров, ингибиторы протеасомной деградации служат молекулярным инструментом, с помощью которого удастся раскрыть связь между клеточной смертью и работой протеасомы. Но не менее важно и другое: если к апоптозу злокачественных клеток приводят ингибиторы, возможно, они могут послужить медицине как противораковые средства.

Белки-субстраты и болезни

Деградация белков протеасомой — процесс с тонкой настройкой, поэтому сбои в нем, нарушающие равновесие между пролиферацией и апоптозом, служат причиной разных болезней как врожденных, так и приобретенных. Условно их можно разделить на две группы: заболевания, обусловленные тем, что деградационная система не работает, и болезни, которые возникают из-за усиления ее

функции. Первые — это результат стабилизации субстратов, быстро разрушаемых в норме, вторые, наоборот, — аномально быстрого распада белков-мишеней.

Мы говорили, что клеточный белок p53 при заражении онкогенным штаммом вируса папилломы человека соединяется с вирусным онкобелком E6 и становится субстратом для ускоренной деградации протеасомой. В результате лишённая защиты клетка — мишень вирусной атаки — превращается в раковую. Действительно, при некоторых формах карциномы уровень клеточного p53 бывает резко снижен. Предполагают, что таким способом вирус может неконтролируемо размножаться в клетке, и она становится злокачественной. Агрессивные формы рака прямой кишки и молочной железы исследователи тоже связывают с работой протеасомной системы, хотя механизм образования трансформированных клеток здесь другой.

Видимо, некоторые врожденные заболевания человека обусловлены генетическими изменениями или в белках-субстратах, или в ферментах, отвечающих за сшивку с убиквитином. Фиброкистоз, например (его признаки — хроническая закупорка и инфекция дыхательных путей, нарушение пищеварения), связан с мутацией, приводящей к преждевременному гидролизу протеасомой мембранного белка, который регулирует транспорт ионов хлора через мембрану эпителиальных клеток. При синдроме Ангельмана (задержка умственного развития) обнаружены делеция части X-хромосомы и поврежденные молекулы фермента из семейства E3. Редкая наследственная форма гипертонии, или синдром Лиддла, обусловлена делецией в генах субъединиц белка, который формирует натриевые каналы в клетках эпителия. В итоге меняется скорость гидролиза субъединиц протеасо-

мой и, как следствие, — баланс между ионами калия и натрия (т.е. нарушается солевой гомеостаз).

Целый ряд известных аутоиммунных заболеваний может быть вызван неправильным разрезанием белка протеасомой. Она ведь гидролизует и собственные нормальные клеточные белки, и чужеродные. Но из образующихся пептидов только чужие становятся антигенами, именно по ним цитотоксические лимфоциты узнают заражённую клетку и уничтожают ее. Свои же пептиды не вызывают T-клеточного ответа. Однако, если по какой-либо причине протеасома неверно расщепляет субстрат, то и из собственных белков могут возникать нетипичные пептиды, которые распознаются T-лимфоцитами как чужеродные. И тогда клетки организма, ничем не заражённые, становятся мишенью для атаки. По-видимому, с протеасомной системой связаны многие иммунные заболевания и воспалительные реакции, но конкретные механизмы их возникновения отнюдь не одинаковы.

Интересно, что вирусы могут уйти из-под контроля иммунной системы, причем разными способами. Вирус гепатита В, например, достигает этого за счет взаимодействия собственного белка X с субъединицами 20S протеасомы и регулятора PA28. В такой комбинации протеолиз подавляется и белок X остается целым. А раз нет пептидов-антигенов, иммунная система не воспринимает заражённую клетку. Цитомегаловирус человека не предохраняет свои белки от гидролиза, а способствует разрушению белковых молекул главного комплекса гистосовместимости, которые отвечают за транспорт: пептиды-антигены не попадают на поверхность заражённой клетки, и та выживает. Другие вирусные белки взаимодействуют с протеасомными АТФазами, увеличивая скорость гидролиза

внутриклеточных белков и приводя к усиленному размножению вируса.

При многих нейродегенеративных заболеваниях (в их числе болезни Альцгеймера, Паркинсона и др.) выявлены сенильные бляшки, различные тела включения и дегенеративные волокна, обогащенные убиквитином. Однако лишь на этом основании трудно понять, какова роль протеасомной системы в развитии данных патологий. Правда, в одном случае она проявляется нагляднее. В нейронах есть белок пресенилин-2 (PS2), который пронизывает мембрану и участвует в транспорте предшественников амилоидов и последующем их превращении в амилоид β -42. Для нормальной работы PS2 от него отщепляется C-концевой фрагмент и разрушается протеасомой. Если подавить ее работу ингибиторами, фрагмент будет накапливаться, к такому же результату приводят мутации в гене белка PS2. А они обнаружены в большинстве случаев раннего проявления семейной формы болезни Альцгеймера. Таким образом, в ее патогенезе может играть роль накопление C-концевого фрагмента, вызванное мутациями в гене или действием ингибиторов протеасомы.

Установлено, что в дистрофии скелетных мышц, обусловленной голоданием, сепсисом и денервацией, виноват усиленный гидролиз мышечных белков протеасомой. Но активирующие ее внеклеточные стимулы и сигнальные пути пока не ясны.

Предполагают, что накопление окисленных белков при старении связано с нарушениями протеасомной деградации. И это не лишено основания.

* * *

Прошло 20 лет с открытия специфического внутриклеточного протеолиза. За это время в мире сложилось несколько научных центров по изучению протеасомы, ее генов и регуля-

ции их считывания. Надо сказать, что в лаборатории структуры и функции хроматина Института молекулярной биологии им. В.А.Энгельгардта РАН обнаружена новая сигнальная цепь, которая контролирует зависимость от АТФ гидролиз белков протеасомой [6, 7]. Оказалось, у пекарских дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*) короткоживущий белок Rpn4 служит фактором транскрипции, регулирующим работу более 500 генов,

которые кодируют большинство субъединиц протеасомы и ферменты, участвующие в протеасомной деградации белков. Таким образом, впервые показано, что расщепление белков контролируется и на уровне транскрипции генов.

Сейчас уже никто не сомневается, что без внутриклеточного протеолиза, который специфически «выводит из игры» в нужное время и в нужном месте важнейшие белковые компо-

ненты, клетка не может обойтись. Сделано очень много, а предстоит еще больше, потому что работа протеолитической частицы теснейшим образом смыкается с патогенезом многих заболеваний. А значит, и с возможностью изменять их течение. ■

Работа поддерживается Российским фондом фундаментальных исследований. Проект 03-04-49127.

Литература

1. Wilk S., Orlowski M. // J. Neurochem. 1983. V.40. P.842—849.
2. Arrigo A.-P., Tanaka K., Goldberg A.L., Welch W.J. // Nature. 1988. V.331. P.192—194.
3. Bachmair A., Finley D., Varshavsky A. // Science. 1986. V.234. P.179—186.
4. Rock K.L., Gramm C., Rothstein L. et al. // Cell. 1994. V.78. P.761—771.
5. Rock K.L., Goldberg A.L. // Ann. Rev. Immunol. 1999. V.17. P.739—777.
6. Mannhaupt G., Schall R., Karpov V. et al. // FEBS Lett. 1999. V.450. P.27—34.
7. Капранов А.В., Курятова А.В., Преображенская О.И., Карпов В.Л. // Мол. биология. 2001. №35. С.356—364.
8. Baumaister W., Walz J., Zubl F., Seemuller E. // Cell. 1998. V.92. P.367—380.

Охрана природы

Контрабанда угрожает слонам

По материалам британской организации «Рожденный свободным», в 1979 г. общая численность африканского и индийского слонов оценивалась в 1.3 млн, в 1990 г. она составила 609 тыс., а к настоящему времени упала до 400 тыс.

Одна из основных причин столь бедственного положения — незаконная торговля слоновой костью, в которую вовлечены 150 стран мира. Ежегодная прибыль от нее составляет несколько сот миллионов евро (продажа 1 кг необработанного бивня дает при-

мерно 100 евро). В 2002 г. было арестовано 16 т этого товара (рекордным задержанием стали 6 т слоновой кости из Южной Африки, доставленные в Сингапур). Перевалочной базой для половины объема всей контрабанды стал Китай. С 1996 г. здесь было задержано 45 т бивней.

Sciences et Avenir. 2002. №670. P.40 (Франция).

История науки

Переписка Гильберта

В Гёттингене (Германия) найдены 132 письма, адресованных немецкому математику Д.Гильберту (1862—1943) и написанных в период расцвета

науки между двумя мировыми войнами. Среди корреспондентов Гильберта были М.Борн, А.Зоммерфельд, М.Планк, А.Эйнштейн. Содержание 18 писем Эйнштейна уже было известно, но их подлинники считались утраченными. Сейчас эти ценнейшие эпистолярные документы, обнаруженные историком науки К.Соммером (K.Sommer), проходят экспертизу. Несмотря на исторический интерес к ним, маловероятно, что они содержат ответы на те 23 задачи, которые математик предложил научному сообществу в Париже в 1900 г. Некоторые из них до сих пор не решены.

Sciences et Avenir. 2002. №667. P.39 (Франция).

Рамейдская

Почва как компонент «Биосферы-2»

А.А.Понизовский, В.Н.Кудеяров

доктора биологических наук

С.А.Благодатский, А.О.Алексеев

кандидаты биологических наук

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Пушино

К.Я.Биль,

доктор биологических наук

Р.Марфи

Центр «Биосфера-2» Колумбийского университета США

Самая большая в мире закрытая система «Биосфера-2» была создана для поддержания длительного автономного жизнеобеспечения людей в условиях циклического круговорота веществ. Это герметичное сооружение из стекла и стальных конструкций было построено в пустыне Сонора (штат Аризона, США) в 1991 г. [1]. Площадь «Биосферы-2» (1.28 га) разделена на несколько биомов, имитирующих земные ландшафты (тропический лес, океан, мангровое болото, саванну, пустыню), к ним примыкает сельскохозяйственный участок. Рядом с базовым модулем находятся блоки инженерного обеспечения: электростанция, блок кондиционирования воздуха и так называемые легкие — два снабженных эластичной мембраной цилиндра общим объемом 43 тыс. м³, куда попадает избыток воздуха, расширяющего-

ся при нагревании в жаркое время; при снижении воздушного давления в холодное время он вновь перетекает в базовый модуль. И хотя об этом уникальном сооружении, спроектированном как прототип космической станции, уже много писали*, стоит вспомнить о первых экспериментах, прежде чем рассказать о новых.

Люди в замкнутом пространстве

Выяснить возможность существования людей в условиях замкнутых циклов — такова была задача первого длительного эксперимента. «Биосфера-2» была рассчитана на проживание восьми человек в течение двух лет. Первая группа добровольцев находилась в полной изоля-

ции от окружающей среды с сентября 1991-го по сентябрь 1993-го. Питались исключительно продуктами, которые сами выращивали в сельскохозяйственном биоме (рисом, кукурузой, бобами, арахисом, сладким картофелем, пшеницей, соей, сорго и др.). Состав и количество растений были рассчитаны, исходя из потребности обитателей в питательных веществах [2]. Молоко и мясо получали от карликовых коз, свиней и кур, размещавшихся в отдельном помещении «Биосферы-2». Все отходы компостировали и применяли как удобрение. Сточные воды очищали в специальных биологических фильтрах и использовали повторно для орошения. Это обеспечивало замкнутый цикл всех питательных элементов.

Экипажу приходилось бороться с сельскохозяйственными вредителями, которых оказалось неожиданно много и для которых вначале отсутствовали естественные враги. Задача была

* Подробнее см. публикации в «Природе»: Нельсон М. и др. «Биосфера-2» (1993. №10. С.66—79); Биосферцы испытывают трудности (1993. №7. С.117); Эксперимент «Биосфера-2» продолжается (1995. №4. С.119—120); Новая жизнь «Биосферы-2» (2002. №1. С.32).

непростой, поскольку химических препаратов против вредителей не применяли. Хотя «биосферцы» интенсивно трудились на участках сельскохозяйственного биома, производимое количество продуктов обеспечивало только низкокалорийную диету. Тем не менее, по мнению врачей, она оказала благотворное влияние на здоровье жителей «стеклянного дома».

Герметичность сооружения проверяли в ходе эксперимента, вводя в воздух в качестве метки нетоксичные гексафторид серы, криптон и гелий. Измерения показали, что обмен воздуха между внутренним объемом и окружающей средой не превышал 10% в год [3].

В течение первого года изоляции выяснилось, что содержание кислорода во внутреннем пространстве системы снизилось с $1.2 \cdot 10^6$ М до $8 \cdot 10^5$ М, а концентрация CO_2 повысилась незначительно (до 0.1%). Первоначально думали, кислород уходит на окисление органического вещества почв [1]. Известно, что на каждый моль O_2 должно выделяться количество молей CO_2 , соответствующее содержанию углерода в органическом веществе. Тем не менее в воздухе «Биосферы-2» количество CO_2 увеличивалось намного меньше, чем сокращались запасы O_2 . Дополнительное количество кислорода могло уходить только на окисление содержащихся в органическом веществе водорода, азота и серы с образованием нитрат- и сульфат-ионов. Но их концентрация в сточных водах оказалась слишком низкой. Невысокое значение pH почвы (<7) не позволяло сделать вывод и о накоплении неорганического углерода в форме карбоната кальция.

Долгое время не могли объяснить такой дисбаланс, пока не нашли место «захоронения» CO_2 . Им оказался бетон, из которого сделано основание и многие части конструкции «Биосферы-2». Дело в том, что цемент содержал около 15%

$\text{Ca}(\text{OH})_2$, который, взаимодействуя с CO_2 , превращался в CaCO_3 . Действительно, анализ кернов бетона из внутренних частей «Биосферы-2» показал повышенные количества CaCO_3 на глубине до 2 см, а толщина карбонизированного слоя кернов из наружных частей сооружения не превышала 0.2 см. Расчеты показали, что, если бы CO_2 не связывался бетоном, его концентрация за счет окисления почвенного органического вещества должна была за 90-дневный зимний период возрасти до 2.2 объемных % [1].

При закладке сельскохозяйственного биома создатели «Биосферы-2» в качестве почвенного субстрата как наиболее плодородного использовали смесь донного осадка пруда (70 объемных %), торфа (15 объемных %) и компоста (15 объемных %). Такой почвенный покров (толщина слоя 1.2 м) содержал много легкоразлагаемого органического материала [2]. Будь его меньше, на окисление не требовалось бы такого большого количества кислорода и положение не было бы столь серьезным. Более того, если бы выделяемый при окислении органического вещества CO_2 поглощали только растения, то за счет фотосинтеза выделялось бы эквивалентное количество O_2 . Однако это не происходило, и к февралю 1993 г., через 1.4 года после герметизации, количество O_2 в воздухе снизилось с 21 до 14 объемных %. «Биосфера-2» находится на высоте 1160 м над ур.м., но содержание кислорода в ее атмосфере соответствовало высоте 5300 м над ур.м. Такая ситуация сказалась на физических возможностях людей, они едва могли подниматься по лестницам своего жилища. Организаторы эксперимента вынуждены были пренебречь принципом полной изоляции и закачали недостающее количество O_2 через систему одного из «легких». Тем не менее, невзирая на все сложности эксперимента, первый экипаж «Биосферы-2»

выдержал испытание и покинул свой герметичный дом в соответствии с исходным планом.

Через полгода, в марте 1994 г., после необходимой профилактики в «Биосфере-2» поселилась вторая группа — из семи человек. Были исправлены многие ошибки первого опыта: загерметизированы некоторые участки оболочки, через которые происходила утечка воздуха, выбрано более удачное соотношение сельскохозяйственных культур и др. Однако вскоре внимание специалистов привлекло значительное увеличение концентрации закиси азота в воздухе до 79 ppm (79 частей на миллион). Обычно закись азота образуется при неполной денитрификации, когда имеется большое количество легко разлагаемых органических азотосодержащих материалов, в данном случае компоста, заложенного в сельскохозяйственный биом. Из-за высокой, опасной для здоровья, концентрации закиси азота «биосферцы» прекратили эксперимент и покинули сооружение.

Начало новой программы

Учитывая опыт двух экипажей, руководители приняли решение переориентировать уникальную лабораторию для изучения влияния повышенной концентрации CO_2 и других парниковых газов на развитие экосистем [1].

В январе 1996 г. «Биосферу-2» передали в управление Колумбийскому университету, который начал использовать ее в качестве базы для обучения студентов, научной лаборатории, а также музея. Для изучения влияния парниковых газов на природные системы пространство «Биосферы-2» разделили стеклянными перегородками на отдельные отсеки, имитирующие природные ландшафты (тропический лес, океан, мангровое болото, саванну и пусты-

ню); биом интенсивного сельского хозяйства и служебные помещения (пост управления, музей, научные лаборатории).

«Биосфера-2» стала открытой, проточной системой с контролируруемыми количествами и составами газов, входящих и выходящих из каждого отсека. В «природные ландшафты» воздух поступает через южное «легкое» с помощью мощной воздухоудовки. Его избыток выходит через специальный клапан, находящийся в нижней части тропического леса. Последний отделен от других отсеков пластиковой мембраной, что позволяет поддерживать в нем заданные влажность и температуру. В каждом биоме работают мощные вентиляторы, благодаря чему температура и влажность воздуха распределяются равномерно. Имеется несколько систем орошения: в тропическом лесу протекает ручей с живописным водопадом (но основной источник воды — система искусственного дождя); в сельскохозяйственном биоме предусмотрены и капельное орошение, и дождевальная система, смонтированная наверху, под стеклянной крышей, а также система искусственного тумана.

Древесные культуры как биологический резервуар CO₂

Повышение углекислого газа в атмосфере беспокоит специалистов многих стран. В США разрабатываются разные технологии по его утилизации. Биологи также не остаются в стороне. В частности, для более интенсивного связывания CO₂ предлагают использовать быстрорастущие генетические линии древовидных и кустарниковых культур, например тополя. Его биомасса может перерабатываться в сырье для изготовления бумаги и таким образом углерод атмосферы может связываться на относительно долгое время.

«Биосфера-2», пожалуй, наиболее удачное место для постановки таких экспериментов, поскольку возможность выращивания древесных пород на достаточно большой площади при регулируемой концентрации CO₂ позволяет избавиться от избытков углекислоты в атмосфере. Подобные исследования крайне актуальны — множество научных лабораторий по всему миру пытаются выяснить, способна ли биосфера Земли справиться с нарастающей концентрацией парниковых газов в атмосфере и потеплением климата. Смогут ли адаптироваться наземные экосистемы, а растения ассимилировать в процессе фотосинтеза накапливающийся в воздухе CO₂, или процесс потепления будет ускоряться?

За последние годы получены новые факты, свидетельствующие, что повышенная атмосферная концентрация CO₂ увеличивает продуктивность растений; стимулирует рост корневой биомассы интенсивнее, чем надземной, а корневые выделения еще в большей степени.

Большинство работ посвящено изучению реакции растений на увеличение концентрации CO₂ и лишь некоторые затрагивают процессы в ризосфере (слое почвы, непосредственно прилегающем к корню растения) и в почве. До сих пор не ясно, как меняется почвенный цикл углерода при повышенном атмосферном содержании CO₂. Зачастую исследователи приходят к противоречивым выводам [4, 5, 6]. Однако многие указывают на опасную тенденцию увеличения эмиссии CO₂ из ризосферы в условиях его повышенной концентрации в атмосфере.

Для изучения физиологических и продукционных характеристик тополя дельтоидного (*Populus deltoides* Barr.) и свойств почв, на которых произрастают растения, сельскохозяйственный биом был трансформирован. Участок площадью 2214 м² и объемом воздуха 38 тыс. м³ раздели-

ли пластиковыми мембранами на три отсека, каждый со своей системой, регулирующей содержание CO₂ в воздухе. С 1999 г. в них поддерживают различные концентрации CO₂: в восточном — 400 ppm (близкая к атмосферной Земли в настоящее время); в центральном — 800 ppm, а в западном — 1200 ppm. Скорость роста деревьев на плодородной почве и при обильном орошении достигает 1 м в месяц. Деревья ежегодно спиливают, а на следующий год они снова вырастают. В ходе наблюдений измеряют некоторые физиологические параметры деревьев и учитывают их надземную биомассу.

Это один из уникальных экспериментов по изучению влияния повышенной концентрации CO₂ в атмосфере на биопродуктивность древесных пород. Он воспроизводит *биогеохимическую* систему в мезомасштабе, включающую ее основные компоненты (атмосферу, растения, почву, воду), состав которых можно регулировать.

Биом интенсивного лесоразведения

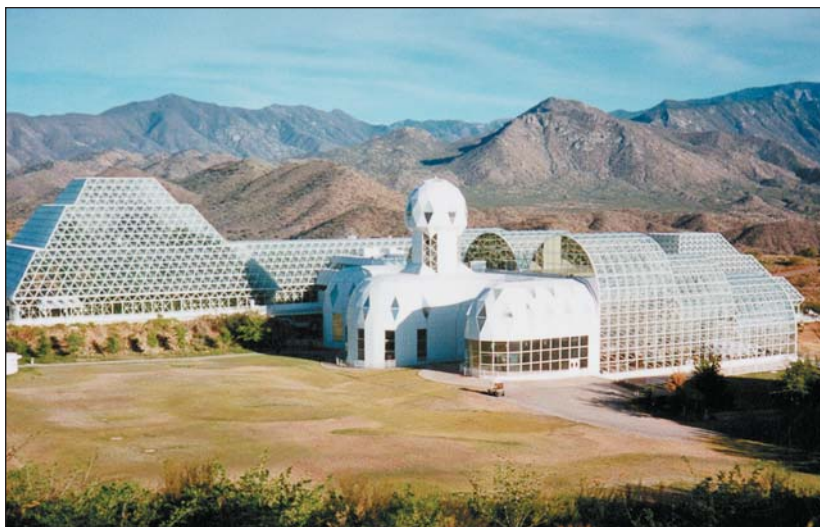
В течение последних двух с половиной лет в биоме интенсивного лесоразведения ведется учет надземной древесной продукции. Обнаружено, что при повышенной концентрации CO₂ (1200 ppm) за первый год надземная биомасса тополя заметно увеличилась по сравнению с нормальной (400 ppm), а за второй год это различие полностью нивелировалось [7]. Однако ответить на вопрос, связано ли это с действием повышенной концентрации CO₂ на продуктивность фотосинтеза, пока нельзя. Во-первых, не учтена биомасса корней, которая составляет значительную часть общей биомассы растений. Во-вторых, продуктивность растений существенно зависит от физико-химических и биологических свойств почвы, а также от ее питательного и водного режи-

мов, а их не исследовали. Корректно оценить влияние атмосферной концентрации CO_2 на продуктивность экосистемы можно лишь, когда фоновые факторы, главный из которых — почва, выравнены. Говоря точнее, в отсеках с разной концентрацией углекислоты в атмосфере почвы должны быть идентичны по pH , питательному и водному режимам, наличию органического вещества и другим свойствам.

Понимая важность роли почв в общем балансе «парниковых газов», президент Центра «Биосфера-2» Б.Осмонд предложил группе сотрудников нашего института провести обследование и анализ почвы биома интенсивного лесоразведения. Напомним, что именно почва, обогащенная органическим веществом, стала причиной снижения содержания кислорода в воздухе закрытой системы. Отметим также, что термин «почва» в данном случае можно использовать весьма условно, поскольку в биома изначально находился искусственный субстрат, состоявший из донных прудовых осадков, торфа и компоста. Однако десятилетнее выращивание растений несомненно преобразовало его в почвоподобный субстрат, который в дальнейшем мы и будем называть почвой.

Итак, нам предстояло установить, в какой степени преобразованный растением субстрат отвечает почвенным признакам. Эксперименты начались в декабре 2001 г. Пробы отбирали почвенным буром из 12 точек во всех трех отсеках биома, послойно: 0–25, 25–50, 50–75, 75–100 (90) см. Затем в Пущине образцы анализировали в течение февраля–апреля 2002 г. Использование методик, рекомендуемых Американским обществом почвоведов [7], позволило сопоставить наши результаты с полученными для этой же почвы ранее.

При отборе проб выяснилось, что толщина слоя почвы в отсеках биома составляет от



Общий вид комплекса «Биосфера-2».

Здесь и далее фото А.А.Понизовского

90 до 100 см, т.е. она уменьшилась на 20–30 см, видимо, из-за усадки грунта. Морфологически почва однородна по глубине, выделить визуально какие-то отличающиеся друг от друга горизонты не удается. Почвенный слой лежит на основании из пустотелых бетонных блоков, расположенных на бетонной плите. Под этой подложкой, в техническом этаже, находятся емкости дренажной воды и всевозможные коммуникации. Уклон основания и проницаемость блоков обеспечивают стекание воды в отверстия, сделанные в нескольких местах каждого отсека. Тем не менее, одинаково ли хорошо работает эта дренажная сеть, пока не ясно, поскольку в центральном отсеке на глубине 80–100 см были участки глеевой почвы.

Обычно быстрее всего в почвах меняется концентрация легкорастворимых солей. Ее можно оценить по электропроводности водных вытяжек, которая пропорциональна суммарному содержанию легкорастворимых солей [8]. Электропроводность водных вытяжек (1:1) из почвы, взятой в разных точках сельскохозяйственного биома, различалась более чем в 100 раз.

При этом ее средние значения и соответственно концентрация солей в западном отсеке во всех слоях были ниже, чем в центральном и восточном. Калия в вытяжках оказалось от 10 до 50% от суммы эквивалентных концентраций легкорастворимых солей, что существенно выше значений, характерных для природных почв. Растворимых солей натрия и магния несколько меньше — соответственно от 4 до 27% и от 6 до 25%, а солей кальция от 35 до 65%.

Причина столь высокой изменчивости кроется в том, что исходно содержание этих солей в почвенном субстрате было достаточно высоким. Кроме того, для сельскохозяйственных культур использовали рециркулируемую воду, из-за чего засоленность почвы возрастала, особенно в восточном и центральном отсеках [9]. Поэтому в 1995 г. почву пришлось промывать пресной водой. В последние годы биом орошают водой, обессоленной на установке обратного осмоса, что также должно приводить к вымыванию солей. Тем не менее пестрота в их распределении сохраняется.

В 1990 г. органическое вещество в почве (в пересчете на уг-



Тополиная роща.

лерод) составляло 3.48% [10]. Сейчас его гораздо меньше: в восточном отсеке — от 2.0 до 2.9%, в центральном — от 2.2 до 2.7% и в западном — от 1.7 до 3.1%. Выращивание в биоме сельскохозяйственных культур в течение более чем 10 лет не вызвало заметных профильных различий: во всех слоях почвы содержание органического вещества примерно одинаково.

Трансформация органического углерода в почве прежде всего связана с ее биологической активностью, основной показателем которой — дыхание. При естественной влажности интенсивность дыхания почвы

оставалась небольшой и не различалась между участками с разным уровнем атмосферного CO_2 . Причиной тому могла быть низкая почвенная влажность, которая подавляет микробную активность и сглаживает различия между вариантами. При оптимальной влажности дыхание почвы было выше в западном отсеке (1200 ppm CO_2) и приблизительно равное для центрального и восточного отсеков (800 и 400 ppm). Такую же разницу получили для субстрат-индуцированного дыхания, которое характеризует уровень микробной биомассы в почве. Это можно объяснить как большей

доступностью органического вещества для микроорганизмов, так и их большей биомассой. Первое подтверждается активностью базального дыхания, а второе — высоким содержанием микробной биомассы.

Полученные результаты отражают фактическое изменение дыхательной активности и количества микробной биомассы на участках с повышенной концентрацией CO_2 (1200 ppm). Для количественной характеристики этого явления, а также установления связи между продуктивностью растений, интенсивностью корневого опада и процессов почвенного цикла углерода необходимы дальнейшие исследования.

Поскольку в большинстве случаев pH почвы (водная вытяжка 1:1) оказалась от 7.0 до 8.0, нельзя исключить, что в настоящее время почва поглощает CO_2 , связывая его в форме карбоната кальция. Однако в западном отсеке, в местах, где когда-то выращивали рис, величина pH снижена до 6.9 в слое 0—25 см и до 5.4 в слое 75—90 см.

Емкость катионного обмена почвы достаточно высока. В центральном и, особенно, в восточном отсеках она уменьшается вниз по профилю, а в западном — практически не меняется. В составе обменных катионов преобладают кальций (60—78%), магний (13—19%) и натрий (от 2 до 9%). Больше всего обменного натрия на участках западного отсека, где ранее выращивали рис, и в одной из точек восточного отсека. Содержание обменного калия в почве составляет от 5 до 12% от суммы катионов, что существенно выше значений для большинства почв [11].

Во всех трех отсеках гранулометрический состав почвы достаточно однороден: в среднем 30% песчаной фракции, 36% пылевой и 34% илистой. К этой почвенной массе примешано от 9 до 29% гравия (> 2 мм), содержание которого, как правило, снижается вниз по профилю.



Биом интенсивного лесоразведения.



Почвенный бур в западном отсеке биома.

Гранулометрический состав не меняется по глубине, видимо, вследствие удовлетворительно перемешивания субстрата перед заполнением им площади биома.

Соотношение двух- и трехвалентного железа в почвах оценили с помощью мессбауэровской спектроскопии: во всех отсеках железо находится в виде Fe^{3+} (~95%). Магнетит (Fe_3O_4) и другие оксиды железа (гематит, гетит и др.) определяют, в основном, магнитную восприимчивость почв. Профильное распределение этого показателя обычно во многом отражает характер и интенсивность почвообразования. Оказалось, что в центральном отсеке в слое 0–25 см количество оксидов железа такое же, как и в слое 75–100

см. В западном отсеке в слое 0–25 см их несколько больше, чем в слое 75–100 см, хотя различие невелико. Однако в восточном отсеке в придонном слое 75–100 см концентрация оксидов, судя по магнитной восприимчивости, существенно выше, чем в поверхностном слое и в почве двух других отсеков. Такой эффект скорее всего вызван исходной неоднородностью субстрата. Как правило, в природе повышенная концентрация оксидов железа встречается в поверхностных слоях почвы, которые хорошо аэрируются.

* * *

Состав современных почв формировался на протяжении тысячелетий под влиянием био-

логических и абиогенных факторов. Воспроизвести искусственно такое природное тело во всей полноте практически невозможно. Однако создаваемые почвоподобные субстраты, в том числе и сформированный в «Биосфере-2», безусловно, способны выполнять основные функции почв. Происходящие там процессы (минерализация, иммобилизация, аммонификация, нитрификация, денитрификация и гумусообразование) приближают субстрат к естественной почве. Одна из главных функций почвы — плодородие. Изученный нами почвенный покров, судя по наличию в нем питательных веществ в доступных для растений формах, достаточно плодороден и похож на хорошую огородную почву.

Один из главных выводов, полученных при обследовании почвы биома, — большая пространственная пестрота физико-химических, химических и биологических (почвенное дыхание) свойств во всех отсеках. Наибольшая вариабильность установлена для подвижных форм азота (NO_3NH_4), легкорастворимых солей, органического вещества, для соотношения окисного и закисного железа. Какой-либо связи между химическими показателями и атмосферной концентрацией CO_2 в отсеках не замечено. Вероятно, причина и в неоднородности исходной смеси, особенно загрузки в биом, и в особенностях сельскохозяйственного использования: выращивания различных по водопотреблению культур, начиная от суходольных злаковых (пшеницы) и кончая затопляемыми (рисом). Известно, что затопление создает анаэробные условия, способствующие трансформации органического вещества с образованием метана. В местах, где культивировали рис, отмечено подкисление и появление глеевой почвы в нижних горизонтах.

При выращивании тополя в последние два-три года применялось большей частью капельное орошение с размещением оросительных трубок вблизи деревьев, вследствие чего большая площадь биома не увлажнялась. Это привело к накоплению в отдельных местах

высоких количеств подвижных форм азота (аммонийного и нитратного).

С момента закладки субстрата прошло 12 лет. Сегодня он приобрел свойства, характерные для высокоплодородных огородных почв, и пригоден для выращивания на нем различных культур, включая и древесные. Однако существенным недостатком этого почвенного покрова остается его высокая пространственная пестрота, что значительно осложняет проведение экспериментов с различной концентрацией углекислоты в атмосфере. Преодолеть этот недостаток можно, прибегнув к тщательному перемешиванию почвы, взятой в равных количествах из разных мест всех отсеков биома. Такая работа была выполнена в апреле—мае 2002 г. В каждом отсеке установили размещенные случайным образом пластиковые цилиндры диаметром 1.5 м и глубиной 1 м в трехкратной повторности. Цилиндры во всех отсеках заполнили достаточно однородной почвой и в каждый цилиндр посадили по одному черенку тополя дельтоидного (*Populus deltoides* Barr.).

Поставленный таким образом эксперимент позволяет изучить влияние возрастающей концентрации CO_2 (400, 800, 1200 ppm) на структуру его баланса — соотношение прихода (дыхания растений и почвенной микрофлоры) и расхода

(чистой первичной продуктивности фотосинтеза). Кроме того, можно попытаться установить воздействие различных концентраций CO_2 на основные почвенные свойства, особое внимание обращая на биологическую активность почвы. Постановка новой серии опытов по оценке биогеохимического цикла углерода с участием древесных растений в «Биосфере-2» действительно открывает уникальные возможности для решения таких задач. Станция располагает весьма совершенной системой для поддержания и контроля CO_2 в воздухе и позволяет выращивать деревья в таких условиях, причем в достаточных количествах. Кроме того, накопленный опыт применения методов стабильных изотопов позволяет работать на высоком научном уровне и приглашать для выполнения наиболее сложных экспериментов ученых со всего мира. В этом, видимо, и состоит высокая миссия «Биосферы-2». ■

Авторы выражают глубокую признательность Б.Осмонду, а также сотрудникам Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. Часть аналитических работ проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №00-04-48427) и Ведущей научной школы (грант №00-15-97917).

Литература

1. Broecker W.S. // GSA Today. 1996. V.6. №7. P.1—7.
2. Marino B.D.V., Mabato T.R., Druitt J.W. et al. // Ecological Engineering. 1999. V.13. P.199—234.
3. Dempster W. // Adv. Space Res. 1994. V.14. №11. P.331—335.
4. Ball A.S., Milne E., Drake B.G. // Soil Biology and Biochemistry. 2000. V.32. №5. P.721—723.
5. Ginkel J.H.van, Gorissen A., Polci D. // Soil Biology and Biochemistry. 2000. V.32. №4. P.449—456.
6. Sowerby A., Blum H., Gray T.R.G., Ball A.S. // Soil Biology and Biochemistry. 2000. V.32. №10. P.1359—1366.
7. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2-nd ed. Agronomy Series 9 / Eds A.M.Page, R.H.Miller, D.R.Keeney. Madison; Wisconsin, 1982.
8. Поуэлл Д. Почвоведение: Методы и их применение. М., 1998.
9. Torbert H.A., Johnson H.B. // J. Soil and Water Conservation. 2001. №1. P.4—11.
10. Rosello-Mora et al. // System Appl. Microbiol. 1994. V.17. P.569—573.
11. FitzPatric E.A. Pedology. A systematic approach to soil science. Edinburgh, 1971.

Мир ориентационного беспорядка в кристаллах

Нейтронные исследования

А.В.Белушкин, Д.П.Козленко

В настоящее время два актуальных направления науки, физика твердого тела и физика жидкости, фактически объединились в одно — физику конденсированных сред. Действительно, грань между понятиями «твердое тело» и «жидкость» очень условна.

Среди объектов, именуемых твердыми телами, можно выделить два диаметрально противоположных типа. Первый — идеальный кристалл, характеризующийся упорядоченным расположением атомов. Часто говорят, что кристаллы обладают «дальним» порядком, подразумевая при этом следующее: положение всех атомов в кристалле может быть описано с помощью перемещения (трансляции) определенной группы атомов вдоль трех независимых векторов (векторов трансляции) на заданные расстояния. Векторы трансляции образуют многогранник — элементарную ячейку кристалла, а их абсолютные величины называются параметрами элементарной ячейки. Наличие «дальнего» порядка приводит к возникновению определенной симметрии расположения атомов. В начале 90-х годов XIX в. русский кристаллограф Е.С.Федоров и немецкий геометр А.Шенфлис независимо



Александр Владиславович Белушкин, доктор физико-математических наук, директор Лаборатории нейтронной физики им.И.М.Франка (Объединенный институт ядерных исследований, г.Дубна). Область научных интересов — нейтронные исследования свойств конденсированных сред.



Денис Петрович Козленко, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела нейтронных исследований конденсированных сред той же лаборатории. Занимается дифракцией нейтронов в кристаллах.

друг от друга построили 230 пространственных групп симметрии, используемых в настоящее время для описания структуры кристаллов. В России эти группы часто называются федоровскими.

Другой предельный случай — аморфное твердое тело, в котором «дальний» порядок полно-

стью отсутствует, т.е. симметрии во взаимном расположении атомов нет. Его можно рассматривать как своего рода «застывшую жидкость». Атомы в целом разупорядочены, а определенная степень упорядоченности наблюдается только в конфигурации наиболее близко расположенных друг к другу атомов.

© А.В.Белушкин, Д.П.Козленко

Поэтому часто говорят, что в аморфных телах и жидкостях существует «ближний» порядок. В отличие от кристаллического состояния, являющегося равновесным, аморфное состояние вещества — неравновесное. Однако времена релаксации, характеризующие процесс перестройки аморфной структуры в равновесную кристаллическую за счет диффузионных (тепловых) смещений атомов, очень велики и могут составлять многие тысячи и миллионы лет.

Беспорядок в кристаллах

Важное место между рассмотренными выше предельными случаями занимает промежуточный тип объектов — кристаллы с частичным разупорядочением некоторых структурных элементов (атомов, молекул или ионов). Рассмотрим кристалл из атомов двух видов — А и В. Элементарные ячейки кристалла АВ формируют упорядоченные трехмерные сетки атомов А и В, которые определенным образом сочетаются друг с другом. Удалим произвольным образом из различных элементарных ячеек нашего кристалла часть атомов типа В. Число оставших-

ся атомов этого типа меньше количества эквивалентных позиций, которые они могут занимать, и атомы окажутся случайно распределенными между такими позициями в кристалле. Расположение атомов типа В относительно друг друга и относительно атомов типа А уже не симметрично и имеет такой же характер, как в аморфном теле. Возникает явление, которое называется позиционным беспорядком (рис.1).

При достаточно высоких температурах тепловые возбуждения могут привести к перемещению (диффузии) атомов из занимаемого ими положения к ближайшему свободному. В этом случае возникает динамический позиционный беспорядок, лежащий в основе такого интересного физического процесса, как ионная проводимость, которая широко задействована в технике.

Представим теперь, что описанные выше разупорядоченные атомы входят в состав молекул или молекулярных ионов; тогда атомы, принадлежащие одной молекуле (иону), соединены ковалентными связями. Если в кристалле число возможных позиций для размещения таких атомов превышает количество последних, образуется

несколько энергетически эквивалентных положений для всей молекулы или иона (рис.1). Поскольку молекулы и молекулярные ионы обычно выглядят как многогранники и многоугольники, их положение в пространстве можно охарактеризовать определенной ориентацией, связанной с какой-либо осью симметрии молекулы. Здесь мы имеем дело с ориентационным беспорядком — случайным распределением молекул (ионов) заданного типа между несколькими эквивалентными позициями (ориентациями). Такой беспорядок отличается прежде всего его геометрией. Если энергия тепловых колебаний молекулы превышает высоту потенциального барьера, разделяющего близлежащие эквивалентные ориентации, молекула может перескочить из исходного в положение с другой возможной ориентацией. Так возникает динамический ориентационный беспорядок. Его характеристики — энергия, необходимая для упомянутого перескока молекулы (энергия активации), и время, которое молекула проводит в положении с той или иной ориентацией (время корреляции), — могут быть рассчитаны или измерены в предположении конкретной геометрической модели ориентационного беспорядка.

Ориентационное разупорядочение распространено довольно широко: оно наблюдается во многих молекулярных и молекулярно-ионных кристаллах, в частности содержащих молекулы воды H_2O , аммиака NH_3 , аммония NH_4 и метана CH_4 [1].

Как заглянуть в мир ориентации

Кристаллам с ориентационным беспорядком свойственны черты и кристаллического, и аморфного состояния вещества. Как известно, стандартными методами исследования струк-

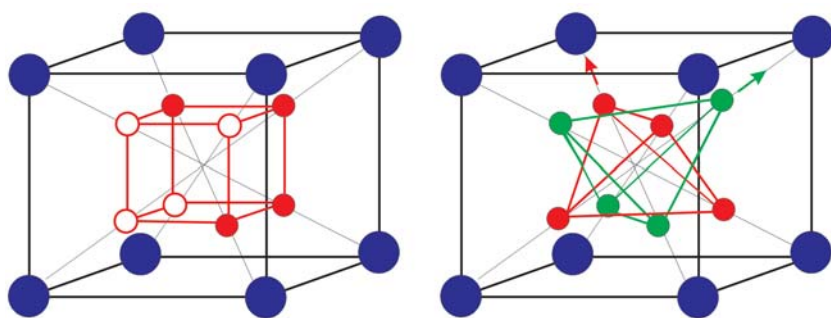


Рис. 1. Примеры позиционного (слева) и ориентационного (справа) беспорядка в кристалле. В первом случае четыре атома случайно разупорядочены по восьми возможным положениям, имеющим кубическую симметрию относительно центра элементарной ячейки кристалла. Показан один из $8!/(4!)^2 = 70$ вариантов их размещения. Во втором — четыре атома объединены в тетраэдрическую молекулу. Теперь существуют только два возможных энергетически эквивалентных положения молекулы с разными ориентациями.

туры материалов любого сорта давно служат рентгеновская и нейтронная дифракция (когерентное упругое рассеяние). При работе с водородосодержащими кристаллами нейтронная дифракция предпочтительнее, поскольку амплитуда рассеяния рентгеновского излучения на атомах водорода очень мала. Однако атомы водорода дают большое некогерентное рассеяние нейтронов, что затрудняет регистрацию дифракционных данных — возникает фон. Поэтому для экспериментов по нейтронной дифракции обычно используются кристаллы, в которых водород изотопически замещен дейтерием (его сечение некогерентного рассеяния значительно меньше). Изотопическое замещение, как правило, слабо сказывается на структурных параметрах, так что структуру водородосодержащих и дейтерированных кристаллов с большой степенью точности можно считать одинаковой.

Характерный дифракционный спектр поликристаллического материала (рис.2) содержит набор максимумов (пиков), положения которых определяются межплоскостными расстояниями d_{hkl} для различных семейств кристаллографических плоскостей в соответствии с законом Брэгга—Вульфа: $2d_{hkl}\sin(\theta)=\lambda$. Здесь θ — угол Брэгга (равный половине угла рассеяния излучения, λ — длина волны излучения, a индекс (hkl) характеризуют ориентацию группы кристаллографических плоскостей с межплоскостным расстоянием d_{hkl} относительно системы координат кристалла. Беспорядок в расположении атомов или молекул и другие дефекты в кристалле вносят некогерентный, диффузный вклад за счет рассеяния на неоднородностях структуры.

Очевидно, что результаты дифракционного эксперимента могут заключать в себе информацию о геометрии ориентаций молекул в кристалле лишь в том случае, если характерное время

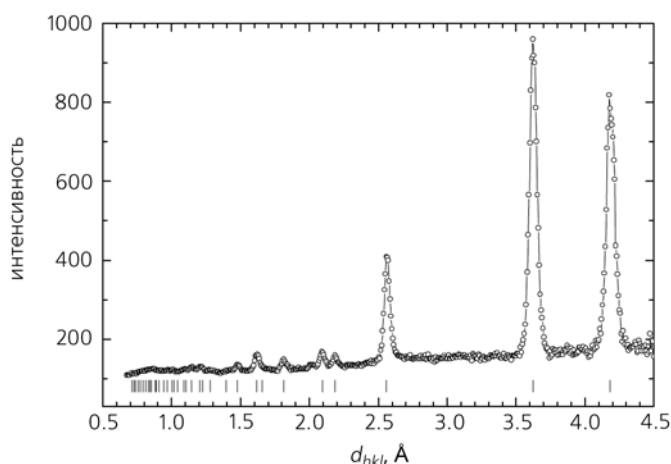


Рис.2. Пример дифракционного спектра, полученного на поликристаллическом образце ND_4I . Черточками показаны положения дифракционных пиков.

между двумя последовательными сменами ориентации меньше времени взаимодействия нейтронной волны с атомами кристалла. В нейтронной дифракции используются так называемые тепловые нейтроны, которые вырабатываются в стационарных и импульсных исследовательских ядерных реакторах. Распределение тепловых нейтронов по энергиям имеет форму максвелловского спектра с максимумом при энергии $E \sim 0.025$ эВ, что соответствует скорости нейтрона $v \sim 2200$ м/с [2]. При обычном расстоянии между соседними атомами кристалла $a \sim 10^{-10}$ м время взаимодействия нейтронной волны с ними имеет порядок $t \sim a/v = 5 \cdot 10^{-14}$ с. Если промежуток времени между переориентациями молекул $\tau \gg t$, то дифракция нейтронной волны в данный момент времени будет нести информацию о мгновенном «снимке» структуры, усредненном по объему взятого для эксперимента вещества. На таком снимке разупорядоченные молекулы будут «сфотографированы» в тех позициях, где их застала волна в момент рассеяния. Одни молекулы будут находиться в равновесных положениях, а другие бу-

дут застигнуты в пути от одного равновесного положения к другому. Полная экспериментально измеренная за определенный промежуток времени (обычно несколько часов) дифрактограмма содержит набор таких снимков, и при ее анализе можно получить информацию об усредненном по времени и объему пространственном распределении атомов, участвующих в процессе рассеяния излучения (рассеивающей плотности), которое определяется геометрией переориентаций разупорядоченных молекул.

Во многих молекулярных и молекулярно-ионных ориентационно разупорядоченных кристаллах (например, галогенидах аммония NH_4Cl , NH_4Br , NH_4I) $\tau \sim 10^{-9} \div 10^{-12}$ с и соотношение $\tau \gg t$ выполняется с достаточно хорошей точностью. Итак, дифракционные данные зарегистрированы. Какой способ их обработки следует избрать?

Для описания структуры обычного кристалла прежде всего необходимо определить пространственную группу симметрии взаимного расположения атомов. Затем нужно найти координаты независимых атомов,

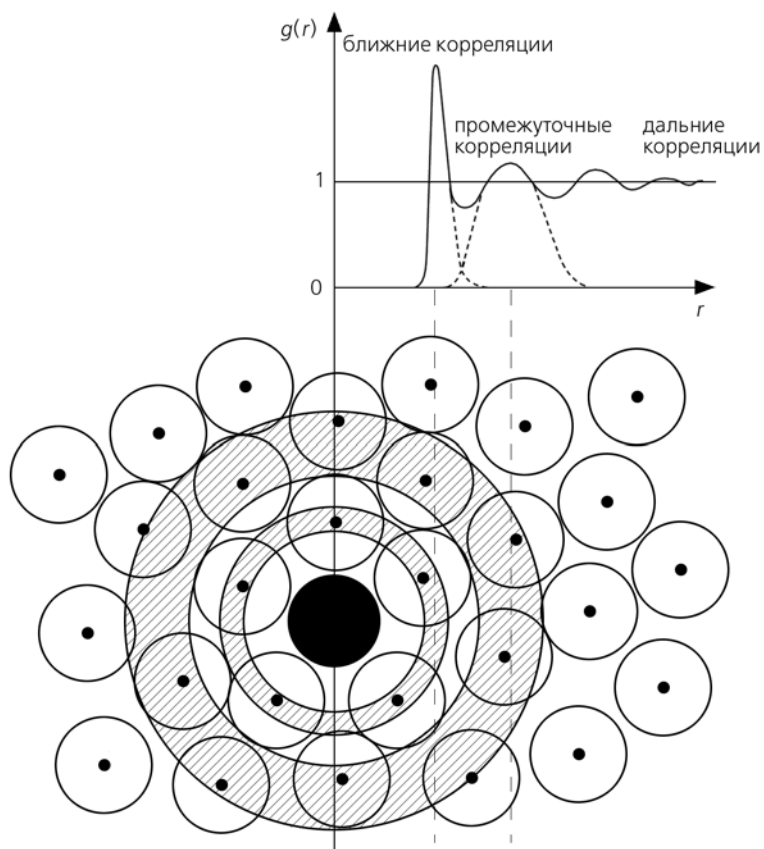


Рис.3. Функция радиального распределения.

перемещение которых в соответствии с соотношениями симметрии пространственной группы позволяет получить положения всех атомов в кристалле, а также тепловые факторы этих атомов, характеризующие их малые тепловые колебания около положения равновесия. Поэтому в основе большинства методов анализа структуры лежит построение структурной модели и последующее определение ее параметров из дифракционных данных. Но при наличии динамического ориентационного беспорядка эти методы позволяют установить лишь средние равновесные положения молекул в структуре. Следовательно, они не помогут выявить тонкие особенности пространственного распределения атомной плотности в динамически разупорядоченных кристаллах.

Анализ структуры аморфного твердого тела требует иных, более общих подходов для описания взаимного расположения атомов: здесь используют функцию радиального распределения $g(r)$, характеризующую корреляции в расположении ближайших атомов. Физический смысл этой функции можно представить следующим образом. Выберем в аморфном веществе некий произвольный атом за начало координат (рис.3). Затем сконструируем сферический слой радиуса r и толщины dr с центром в выбранном атоме. Тогда

$$g(r) = \frac{n_0(r)}{4\pi r^2 \rho dr} \quad (1)$$

Здесь $n_0(r)$ — число атомов, попавших в сконструированный сферический слой, ρ — средняя атомная плотность (усреднен-

ное число атомов в единице объема).

Функция радиального распределения $g(r)$ отражает наличие беспорядка в кристалле и может быть так же получена из результатов дифракционного эксперимента. Однако при определении $g(r)$ в соответствии с формулой (1) все атомы кристалла считаются эквивалентными. Поэтому на основе только этой структурной характеристики без дополнительных предположений о симметрии расположения атомов в кристалле сложно понять, какой конкретно тип молекул ориентационно разупорядочен и какова геометрия ориентационного беспорядка.

Таким образом, для исследования геометрии ориентационного беспорядка в кристаллах требуются иные, более нестандартные подходы. В последнее время было развито несколько методов, позволяющих решить подобную задачу, среди которых стоит отдельно выделить обратный метод Монте-Карло и метод максимальной энтропии.

Игра в кости по-научному

Обратный метод Монте-Карло [3] изначально был создан для изучения структуры аморфных тел и жидкостей и лишь сравнительно недавно стал успешно применяться для решения обсуждаемых здесь задач [4, 5]. Как известно из теории дифракции, интенсивность измеренного в дифракционном эксперименте спектра $I(Q)$ пропорциональна так называемому полному структурному фактору $F(Q)$. Последний соответствует фурье-преобразованию функции $g(r)$, характеризующей пространственное распределение плотности рассеивающих излучение атомов в кристалле. Переменная Q , зависимость интенсивности от которой и регистрируют, — величина переданно-

го от нейтронной волны к образцу импульса; ее можно вычислить, зная угол рассеяния 2θ и длину нейтронной волны λ , как $Q = 4\pi\sin(\theta)/\lambda$ или, согласно закону Брэгга—Вульфа, как $Q = 2\pi/d_{hkl}$. С помощью обратного метода Монте-Карло производится анализ вклада в $F(Q)$ как от когерентного упругого рассеяния (дифракции), так и от некогерентного (диффузного) рассеяния.

Сначала создается исходная модельная конфигурация (обычно в форме куба), состоящая из заданного количества атомов N . На конфигурацию накладываются периодические граничные условия, т.е. функция, заданная в объеме куба, должна принимать одинаковые значения на противоположных его гранях. Размеры куба L выбираются в соответствии с известной плотностью системы $\rho = N/L^3$. Затем проводится моделирование, в результате которого находится та конфигурация атомов, которая отвечает экспериментальным дифракционным данным в пределах погрешности измерения.

Алгоритм расчета таков. Для исходной конфигурации атомов по формуле (1) вычисляется функция радиального распределения $g_o^c(r)$ и соответствующий полный структурный фактор $F_o^c(Q)$, являющийся ее фурье-образом. Затем модельное значение $F_o^c(Q)$ сравнивается с экспериментально измеренным $F^E(Q)$. Подобное сравнение можно провести, используя параметр максимального правдоподобия:

$$\chi_o^2 = \sum_{i=1}^m [F^E(Q_i) - F_o^c(Q_i)]^2 / \sigma^2(Q_i); \quad (2)$$

здесь $\sigma(Q_i)$ — экспериментальная погрешность в i -й точке дифракционного спектра, m — число точек спектра. Один из атомов смещается случайным образом. Для измененной конфигурации вычисляются новые $g_n^c(r)$, $F_n^c(r)$ и соответствующий параметр максимального правдоподобия χ_n^2 . В зависимости от значения χ_n^2 по сравнению с χ_o^2

новая конфигурация принимается с соответствующей вероятностью, и координаты атома в модели корректируются. Далее процедура повторяется.

В процессе работы алгоритма происходит уменьшение параметра χ^2 до некоторой минимальной величины, а полученное трехмерное распределение атомов будет отвечать экспериментальным данным в пределах ошибки*. К преимуществам метода следует отнести то, что он не требует предполагать что-либо заранее о характере потенциала межатомного взаимодействия.

Но зачастую существует несколько возможных вариантов расположения атомов в структуре, дающих примерно одинаковый вклад в дифракционный спектр. В этом случае удобнее использовать методы структурного анализа, позволяющие найти распределение рассеивающей плотности атомов без построения конкретной структурной модели для расчетов. Один из таких современных методов — метод максимальной энтропии. Его математические основы [6] были развиты для решения некоторых задач теории информации, а первые применения в области кристаллографии были связаны с поиском распределения электронной плотности в кристаллах по дифракционным данным. Развитие этого метода для изучения структуры дефектных и частично разупорядоченных кристаллов также оказалось перспективным.

В отличие от предыдущего метод максимальной энтропии учитывает лишь когерентное рассеяние: анализируется набор экспериментальных значений структурных факторов F_{hkl} , соответствующих дифракционным пикам от различных семейств кристаллографических плоско-

стей с межплоскостными расстояниями d_{hkl} , т.е. при $Q = 2\pi/d_{hkl}$.

Здесь для расчетов задается исходная модельная атомная рассеивающая плотность $m(r)$ (например, просто однородное распределение атомной плотности по объему кристалла). Элементарная ячейка делится на M частей (пикселей) одинакового размера, при этом значение рассеивающей плотности атомов считается постоянным в пределах одного пикселя. Для нахождения искомого распределения атомной рассеивающей плотности в кристалле $\rho(r)$ вводится величина $S(\rho, m)$, имеющая смысл энтропии:

$$S(\rho, m) = -\sum_{j=1}^M p_j \ln \frac{p_j}{q_j},$$

где $p_j = \frac{\rho(r_j)}{\sum \rho(r_j)}$, $q_j = \frac{m(r_j)}{\sum m(r_j)}$. (3)

Затем используют итерационный алгоритм, основанный на поиске максимума специального функционала, который связан с величиной S и в качестве параметра включает уже знакомый нам параметр максимального правдоподобия (2), полученный из экспериментальных и рассчитанных значений F_{hkl} . Найденная таким образом рассеивающая плотность $\rho(r)$ — ближайшая к исходному распределению $m(r)$, которая согласуется с набором экспериментальных величин F_{hkl} в пределах экспериментальной погрешности.

Алгоритмы, лежащие в основе обратного метода Монте-Карло и метода максимальной энтропии, имеют принципиально различные механизмы работы, поэтому результаты анализа экспериментальных данных с помощью этих методов оказываются взаимодополняющими. Проиллюстрируем возможность их применения для исследования геометрии динамического ориентационного беспорядка на двух примерах — молекулярно-ионных кристаллах галогенидов аммония ND_4Cl и ND_4I .

* В структурном моделировании по обратному методу Монте-Карло используется марковский процесс, поэтому конечный результат не зависит от выбора исходной конфигурации.

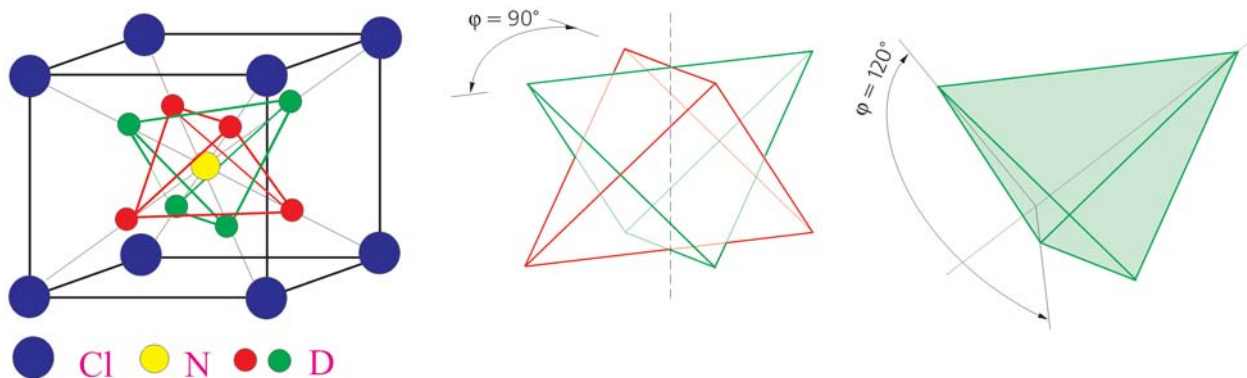


Рис.4. Структура ND_4Cl . Показаны два эквивалентных положения ионов аммония и возможные механизмы их переориентации.

Беспорядок с аммонием

Хлорид аммония ND_4Cl (NH_4Cl) — удобный модельный объект при теоретическом рассмотрении фазовых переходов типа порядок-беспорядок в молекулярно-ионных и молекулярных кристаллах. Различные явления, обнаруженные в этом соединении и характерные для многих других подобных кристаллов, привлекают внимание исследователей уже на протяжении целого ряда лет. Элементарная ячейка хлорида аммония при комнатной температуре имеет форму куба, в вершинах которого расположены ионы

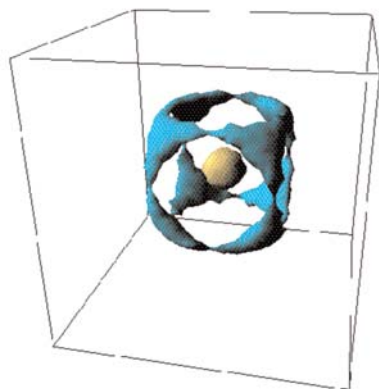


Рис.5. Пространственное распределение плотности атомов дейтерия в элементарной ячейке ND_4Cl , усредненное во времени.

Cl^- , а в его центре — молекулярный ион ND_4^+ (рис.4). На каждый ион аммония приходится два энергетически эквивалентных положения (показанных на рис.4 разными цветами), поэтому ионы аммония случайным образом занимают одно из них. С течением времени ионы ND_4^+ могут совершать перескоки (переориентации) из одной эквивалентной позиции в другую, т.е. возникает динамический ориентационный беспорядок.

Ион аммония имеет форму тетраэдра, и смену им положения можно представить как скачкообразный поворот на 90° вокруг одной из его осей симметрии, которые проходят через центры двух противоположных ребер тетраэдра, перпендикулярных друг другу. Помимо этого, допустимы повороты ионов аммония на 120° вокруг осей симметрии другого типа, которые проходят через вершину и середину противоположного основания тетраэдра. Такие перемещения не приводят к новой ориентации иона (рис.4), но сопровождаются изменением распределения атомной плотности в процессе движения.

Анализируя геометрию ориентационного беспорядка в ND_4Cl , можно установить, какой тип ионных переориентаций является доминирующим [4]. В результате моделирования по обратному методу Монте-

Карло на основе нейтронного дифракционного спектра получено распределение плотности атомов дейтерия в элементарной ячейке ND_4Cl , приведенное на рис.5.

Как видно из рис.5, это распределение имеет форму куба, что согласуется с локальной симметрией расположения ближайших ионов галогена вокруг иона аммония. Центры распределения плотности в вершинах куба (их восемь) отвечают равновесным положениям атомов дейтерия для двух эквивалентных ориентаций ионов ND_4^+ в структуре. Распределение плотности атомов D вокруг вершин соответствует либрационным колебаниям ионов ND_4^+ (угловым колебаниям ионов как целого вокруг положения равновесия). Ненулевая плотность атомов D вдоль ребер куба, соединяющих его вершины, — свидетельство переходов ионов аммония между двумя эквивалентными положениями путем скачкообразных поворотов на 90° .

Другому возможному типу переориентаций — поворотам ионов аммония на 120° , не приводящим к перескоку ионов из одного положения в другое, — должно соответствовать распределение плотности атомов D вдоль диагоналей граней куба. Как доказывает рис.5, атомы в этих областях замечены не были. Оценки показывают, что

вклад такого движения не может превышать 5%.

Построенная геометрическая картина динамического ориентационного беспорядка в ND_4Cl согласуется с результатами анализа динамических характеристик ориентационного беспорядка ионов аммония в родственном соединении NH_4Br с такой же структурой, полученных с помощью спектроскопии квазиупругого рассеяния нейтронов* [7]. Этот факт является дополнительным аргументом в пользу корректности приведенных результатов.

«Либеральный» иодид

Иодид аммония ND_4I (NH_4I) демонстрирует более сложный случай ориентационного беспорядка ионов аммония, чем хлорид аммония. Элементарная ячейка ND_4I при комнатной температуре также имеет форму куба, в вершинах и центрах граней которого расположены ио-

ны Γ , а в центре самого куба и его ребер — ионы ND_4^+ (рис.6). Подобную структуру часто называют структурой типа повальной соли NaCl . В ней ближайшие ионы йода формируют октаэдр, в центре которого располагается тетраэдрический ион ND_4^+ . В такой конфигурации нельзя одновременно приблизить все четыре N-D связи ионов аммония к шести ионам йода на одинаковые минимально возможные расстояния, чтобы сформировались четыре равноправных водородных $\text{N-D}\dots\text{I}$ связи, как это было в случае ND_4Cl (рис.6). Поэтому ND_4I характеризуется большей степенью разупорядочения ионов, близкой к почти свободному вращению.

Для описания равновесной кристаллической структуры ND_4I подходят несколько возможных моделей, различие между которыми заключается в количестве рассматриваемых $\text{N-D}\dots\text{I}$ связей, имеющих одинаковую длину. В самой симметричной из них число эквивалентных положений для ионов аммония минимально (равно восьми), причем три из четырех связей ионов аммония с йодом имеют одинаковые длины

и ориентированы под небольшими углами по отношению к координатным осям x , y и z , а четвертая связь лежит вдоль пространственной диагонали куба (рис.6) [8].

Однозначно определить с помощью обычных методов структурного анализа, какая из предполагаемых моделей структуры ND_4I реализуется в действительности, практически невозможно. Для этого требуется проанализировать геометрию ориентационного беспорядка ионов аммония, определяющую пространственное распределение атомов дейтерия в структуре.

Поскольку в случае ND_4I существует много эквивалентных положений для ионов аммония, чтобы получить достоверный результат, желательно использовать несколько методов, основанных на разных принципах поиска распределения атомной рассеивающей плотности в кристалле. Поэтому для расчетов на основе нейтронного дифракционного спектра ND_4I применяется как обратный метод Монте-Карло, так и метод максимальной энтропии [5].

Полученное в результате моделирования первым методом распределение атомной плот-

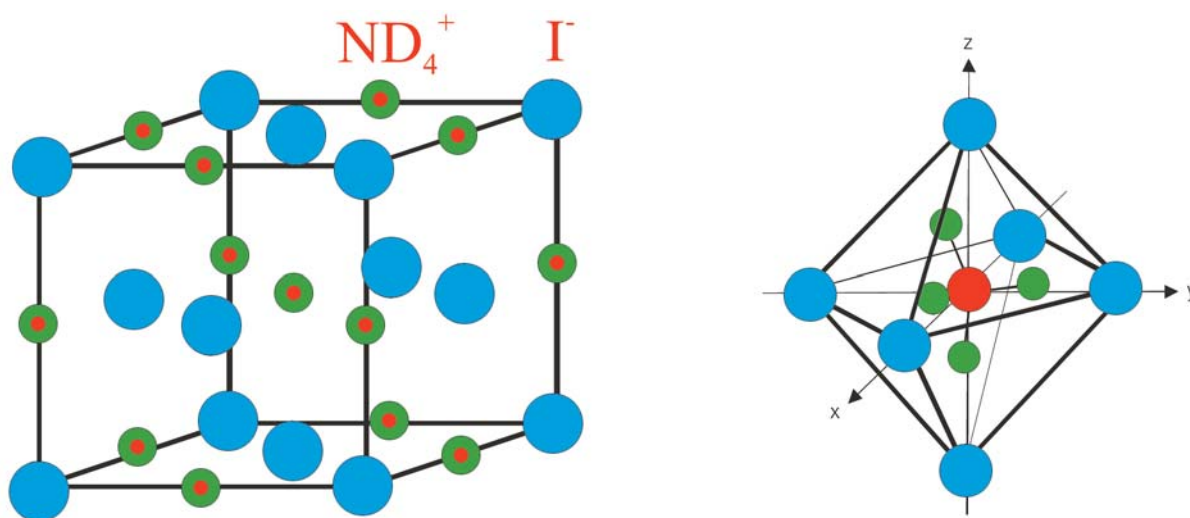


Рис.6. Кристаллическая структура ND_4I (слева). Разупорядоченные ионы аммония изображены как единое целое в виде двухцветных кружков. Октаэдрическое окружение иона аммония (справа). Показано одно из возможных положений иона ND_4^+ для структурной модели, в которой три из четырех связей $\text{N-D}\dots\text{I}$ имеют одинаковую длину.

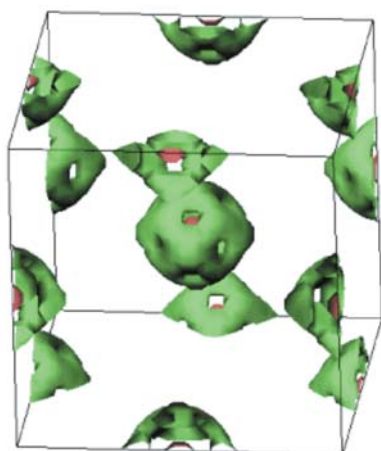


Рис.7. Усредненное во времени пространственное распределение плотности атомов дейтерия в элементарной ячейке ND_4I .

ности дейтерия в элементарной ячейке показано на рис.7. Оно имеет форму октаэдра, что отражает локальную симметрию расположения ближайших ионов галогена вокруг иона аммония. Такая картина соответствует вышеописанной структурной модели, в которой существует восемь эквивалентных положений для ионов аммония. Связи N–D, ориентированные вблизи осей x , y и z , формируют анизотропные распределения атомной плотности дейтерия (на картинке видны выступы и впадины), а связи N–D, ориентированные вдоль пространственных диагоналей куба, — сферические распределения, которые уширены за счет либрационных колебаний ионов аммония. Наличие областей перекрытия у этих распределений показывает, что переориентации ионов аммония в ND_4I происходят за счет скачкообразных поворотов

N–D связей из положений, ориентированных вдоль пространственных диагоналей куба, к положениям вблизи осей x , y , z .

Для независимой проверки результатов анализ структуры ND_4I также был проведен с помощью метода максимальной энтропии. Сравнить распределения рассеивающей атомной плотности, найденные разными методами, удобно по контурным картам, на которых линии соединяют точки с одинаковыми значениями плотности атомов. Такие карты для дейтерия в сечениях элементарной ячейки кристалла плоскостями, перпендикулярными одному из направлений — x , y или z (для кубического кристалла они эквивалентны), приведены на рис.8. Как видно, результаты моделирования обоими методами, несмотря на различие принципов их расчетов, хорошо согласуются между собой.

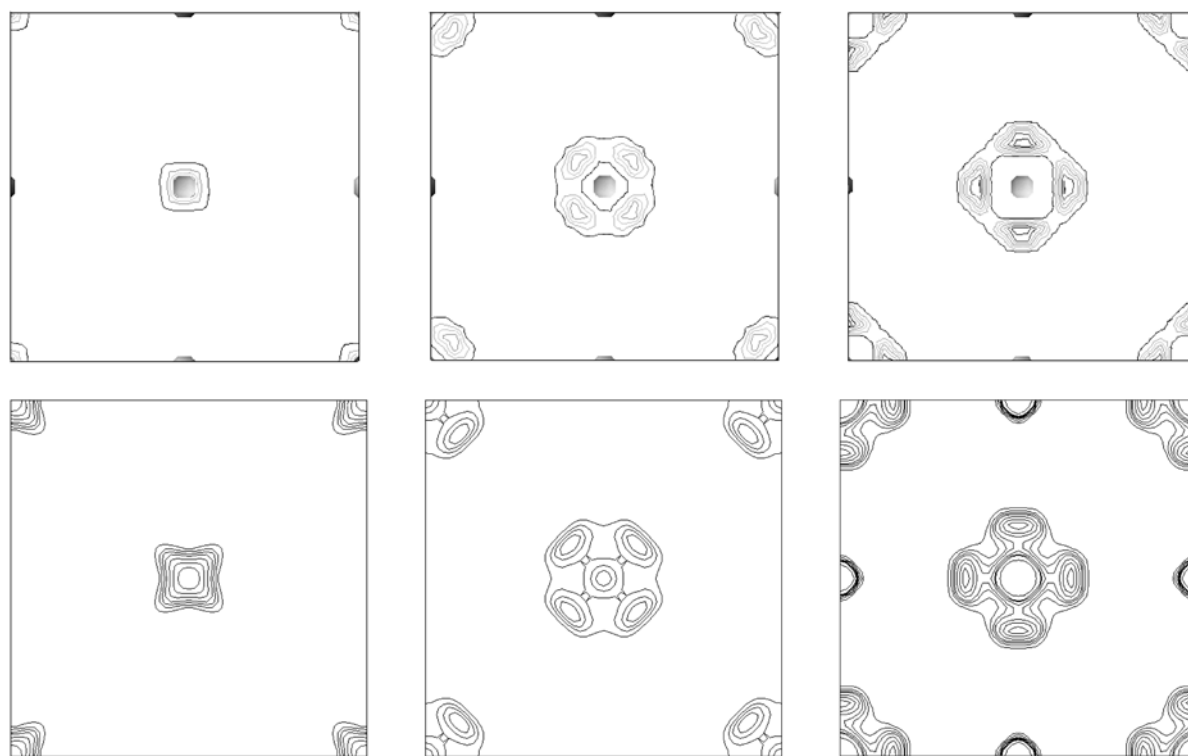


Рис.8. Контурные карты распределения плотности атомов дейтерия в сечениях элементарной ячейки плоскостями, перпендикулярными направлению z . Расстояние между плоскостями 0.483 \AA . Распределение справа соответствует сечению, проходящему через центр куба. Вверху — результат, полученный обратным методом Монте-Карло. Внизу — результат, полученный методом максимальной энтропии.

Геометрическая картина ориентационного беспорядка ионов аммония в ND_4I подтверждается также данными проведенных ранее исследований иодида аммония методом спектроскопии квазиупругого рассеяния нейтронов [9]. Определенные тогда динамические характеристики ориентационного беспорядка удалось разумно интерпретировать только в предположении, что ионы аммония совершают скачкообразные повороты на углы, меньшие 90° . Однако на основе одних динамических характеристик построить конкретную геометрическую модель ориентационного беспорядка в иодиде аммония не удалось.

На примере кристаллов ND_4Cl и ND_4I мы попытались проиллюстрировать возможности исследования геометрических характеристик динамического ориентационного беспорядка

в кристаллах с помощью нетрадиционных методов структурного анализа — обратного метода Монте-Карло и максимальной энтропии. Области применения этих методов в современной физике конденсированных сред постоянно расширяются. Так, недавно метод Монте-Карло был успешно использован для исследования трансляционной диффузии атомов в частично разупорядоченных кристаллах. Подобный подход позволил выяснить макроскопический механизм ионной проводимости в суперпротонном проводнике CsHSO_4 [10]. Моделирование дало возможность проследить траекторию диффузионного движения протонов по кристаллу и вычислить соответствующие коэффициенты диффузии.

Широкие перспективы для исследования структуры сложных кристаллических систем

с динамическим разупорядочением отдельных молекулярных групп или атомов открывает совместное применение стандартных методов и нетрадиционных методов структурного анализа. Сначала в рамках первых строится структурная модель упорядоченного кристаллического «остова» и устанавливаются равновесные положения разупорядоченных молекулярных групп и атомов. Затем с помощью вторых определяется геометрия ориентационного беспорядка разупорядоченных молекул или траектории диффузионного движения разупорядоченных атомов в кристалле. Можно быть уверенными, что таким образом удастся получить много новых интересных результатов. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 00-02-17199.

Литература

1. Парсонидж Н., Стейвли Л. Беспорядок в кристаллах / Пер. с англ. под ред. Г.Н.Жижина. М., 1982.
2. Уиндзор К. Рассеяние нейтронов от импульсных источников. М., 1985.
3. McGreevy R.L. // Nucl. Instr. and Meth. 1995. V.A354. P.1—16.
4. Belushkin A.V., Kozlenko D.P., McGreevy R.L. et al. // Physica B. 1999. V.269. P.297—303.
5. Kozlenko D.P., Belushkin A.V., Knorr K. et al. // Physica B. 2001. V.299. P.46—55.
6. Gilmore C.J. // Acta Cryst. 1996. V.A52. P.561—589.
7. Lechner R.E., Badurek G., Dianoux A.J. et al. // J. Chem. Phys. 1980. V.73. P.934—939.
8. Paasch M., McIntyre G.J., Reebuis M. et al. // Z. Phys. 1996. V.B99. P.339—344.
9. Goyal P.S., Dasannacharya B.A. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1979. V.12. P.219—234.
10. Zetterström P., Belushkin A.V., McGreevy R.L., Shuvalov L.A. // Solid State Ionics. 1999. V.116. P.321—329.

Климатические экстремумы на территории России

А.Н.Кренке,

доктор географических наук

М.М.Чернавская,

кандидат географических наук

Институт географии РАН

Как известно, климат — это среднее состояние погоды за достаточно протяженный отрезок времени. Однако предпосылки для возникновения стихийных бедствий и, следовательно, чрезвычайных ситуаций, столь участвовавших в последнее время, создаются экстремальными значениями климатических характеристик — очень высокими или низкими температурами, интенсивными осадками, сильными ветрами, мощными снежными заносами. Именно они ограничивают пределы возможности жизни человека и его хозяйственной деятельности и поэтому важны для прикладного климатического районирования.

В этой работе мы определяли территориальную приуроченность экстремумов, обращая внимание не столько на пространственное распределение каждой из характеристик, сколько на распространение их сочетаний [1]. В основу районирования и карты положены данные, полученные на 940 российских метеорологических станциях за период около 100 лет [2].

Анализ показал, что более трети территории нашей северной страны занимают районы, где экстремально высокие температуры воздуха $\geq 30^{\circ}\text{C}$, по среднемноголетним данным, случаются

5—10 и более дней в году. Но площадь, где наблюдаются самые низкие (средний из ежегодных абсолютных минимумов $\leq -40^{\circ}\text{C}$) — гораздо больше: примерно три четверти России.

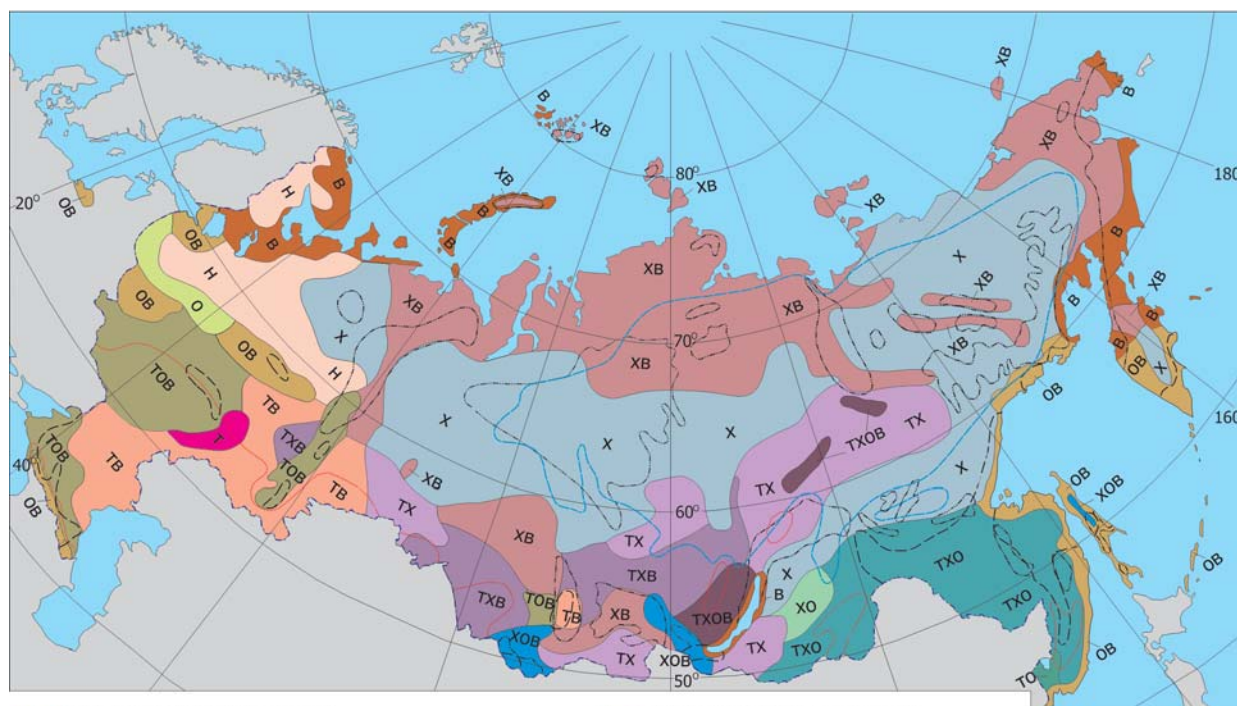
Экстремально интенсивные осадки (50 мм/сут, с вероятностью появления не реже одного раза в 10 лет) выпадают на пятой части нашей территории, сильные ветры (скорость 20 м/с и более, случаются не реже одного раза в 10 лет) отмечаются почти на половине территории страны [3].

Для районирования мы принимали во внимание и снегозапасы, максимальный водный эквивалент которых за сезон превышает 200 мм, что соответствует примерно метровой толщине снежного покрова [4].

Известно, что климатические условия определяются циркуляцией атмосферы и особенностями рельефа — существованием замкнутых котловин, ориентацией склонов и горных хребтов по отношению к преобладающему направлению ветра и т.д. Самые низкие температуры воздуха наблюдаются, когда над Атлантическим и Тихим океанами развивается интенсивная циклоническая деятельность, а стационарный Сибирский антициклон занимает большую часть Евразийского материка. Гребни этого антициклона вытянуты на вос-

точную половину Европейской России, а также на бассейны Лены и Колымы. При таких условиях в январе 1973 г. в Архангельской обл. температура понижалась до -53°C (Сура), в Республике Коми — до -55°C (Печора), в Красноярском крае — до -59°C (Келлог), в Магаданской обл. — до -57°C (Мадаун, Усть-Омчуг). Когда к сибирскому антициклону прибавилась устойчивая полоса повышенного давления, объединяющая его с арктическим регионом, возник абсолютный минимум температуры воздуха для нашей страны, равный -68°C , который наблюдался в Оймяконе в январе 1931 г. и феврале 1933 г.

Летние температурные экстремумы на Русской равнине обычно наблюдаются при формировании поля повышенного давления в результате усиления субтропического Азорского антициклона и распространения его отрога на Европу. Именно при таких условиях зафиксированы абсолютные максимумы температуры воздуха, равные 41°C в Воронежской (Богучар) и Самарской (Красное Поселение) областях и 42°C — в Саратовской (Ершов). Образование области повышенного давления над регионами Сибири также способствует формированию малооблачной погоды и высокого температурного фона. Так,



- ≥ 5 дней в году с максимальной температурой воздуха $\geq 30^\circ$
- Средний из абсолютных минимумов температуры воздуха $\leq -40^\circ$
- Максимальное суточное количество осадков ≥ 50 мм
- Ветер со скоростью ≥ 20 м/с

- ≥ 10 дней в году с максимальной температурой воздуха $\geq 30^\circ$
- Средний из абсолютных минимумов температуры воздуха $\leq -50^\circ$
- Суточное количество осадков ≥ 100 мм
- Территории с максимальными снегозапасами ≥ 200 мм

Сочетания экстремумов

ТХ	ХВ	ТОВ
ТВ	ОВ	ХВ
ХО	ТХВ	Н

Т—тепло; Х—холодно; О—осадки; В—ветер; Н—отсутствие экстремумов

Районирование территории России по сочетанию климатических экстремумов.

в июле 1981 г. интенсивный вынос теплого воздуха из Азии определил возникновение максимумов температуры воздуха на востоке Якутии (36°C в Среднеколымске, Зырянке и 37°C в Арылахе). В июне 1970 г. в Иркутской обл. (Бодайбо) температура поднималась до $+40^\circ\text{C}$.

Экстремальные суточные суммы осадков, превышающие 100 мм, наблюдаются в разных регионах Европейской и Азиатской территории России. Они по большей части локальны, выпадают в летние месяцы и циркуляционные условия их формирования различны. Анализ показывает, что в большинстве случаев в европейской части России такие осадки приходят с южными средиземноморскими циклонами. Так, 14 августа 1904 г. во Вла-

димире выпало 109 мм осадков, 15 августа 1954 г. в Фадеевском (Оренбургская обл.) — 140 мм осадков. В Сочи абсолютный максимум осадков составил 245 мм (18 августа 1971 г.).

На юге Красноярского края и в Якутии также возможны суточные суммы осадков, превышающие 100 мм. Так, 6 августа 1958 г. в г.Ленске выпало 103 мм осадков. Тогда восточный отрог Азорского антициклона занимал всю Европу, южные циклоны шли через Каспийское и Аральское моря на бассейны Оби и Енисея. Еще один пример: выход южных циклонов через Среднюю Азию, а также благоприятная ориентация склонов хребта обусловили выпадение 260 мм осадков на станции Хамар-Дабан 26 июля 1971 г.

Благоприятные условия для формирования рекордных суточных сумм осадков в Амурской обл., Хабаровском и Приморском краях, на Сахалине определяются южными циклонами, проходящими по западной периферии Тихого океана. На Сахалине (Углегорск) выпало 137 мм осадков 3 августа 1981 г., в Хабаровском крае (Усть-Умал) — 158 мм 22 июля 1976 г., в Приморье (Сучан) — 140 мм осадков 27 августа 1946 г. На Камчатке максимум суточных сумм осадков сдвинул на холодную половину года, 9 ноября 1934 г. в Петропавловске-Камчатском выпало 207 мм осадков.

По последним данным, продолжительность действия и повторяемость циркуляционных условий, при которых южные

циклоны активизируются, возрастают на протяжении XX в., и особенно за последние десятилетия [5]. При сохранении этой тенденции возможно ожидать повышения повторяемости и величины экстремумов атмосферных осадков.

* * *

В результате проведенной работы выявлены 50 районов с различным сочетанием опасных климатических экстремумов. Их размеры — от нескольких миллионов до десятков тысяч квадратных километров и меньше. Однородные по набору климатических экстремумов районы выявлены на значительном расстоянии друг от друга и часто различаются по средним климатическим характеристикам; более того, эти показатели могут значительно различаться в пределах одного района, объединенного экстремальными значениями лишь одного из них. Поэтому наше районирование существенно отличается от других схем.

Лишь два района, где климатические экстремумы не выходили за рамки наших критериев, оказываются благополучными с точки зрения угрозы чрезвычайных ситуаций. Оба они расположены на севере европейской части России: это Средне-Карельский, защищенный от ветра Скандинавскими горами, и условно Северо-Русский, охватывающий большую часть бассейнов Северной Двины, Мологи, Шексны, оз.Ильмень и верховьев Камы. К последнему относятся вся Вологодская обл., большая часть Архангельской (кроме ее севера), восток Новгородской и Коми-Пермяцкий округ. Температура самого холодного месяца (на берегу Белого моря в Карелии — февраля) здесь понижается с запада на восток от -9°C в Новгородке до -17°C в Чердыне, самого же теплого месяца остается в пределах от 15 до 17°C , сумма годовых осадков $500-700$ мм. Оба района — равнинные, отличаются избытком влаги и недостатком тепла в го-

довом балансе, покрыты густой сетью рек, озер и болот.

Четыре протяженных района отличаются только экстремально низкими температурами зимой при относительно слабых ветрах — это Печорский (большая часть Республики Коми) и расположенные в зоне влияния Сибирского антициклона Западно- и Средне-Сибирский (полоса шириной в $600-700$ км южнее Полярного круга), а также долина р.Камчатки.

В пределах этих районов средние температуры самых холодных месяцев понижаются от -17°C в Коми до -48°C в котловинах Восточной Якутии — полюсе холода Евразии. Температуры самого теплого месяца меняются от 18° на западе Сибири до 13° на Восточно-Сибирском побережье — самом теплом на Ледовитом океане. Годовые суммы осадков всюду ниже 500 мм, опускаясь до 200 мм и менее в районе полюса холода. Несмотря на относительно малое количество осадков, именно в этих холодных районах (еще на Анадырской низменности в Чукотке, а также на Камчатке) даже на равнинах накапливается более 200 мм снега в водном эквиваленте.

Разнообразнее климатические условия в районах, где единственные экстремумы — большие скорости ветра. Это прежде всего Баренцево-Беломорский район, где благодаря Гольфстриму и исландским циклонам зимой часты ураганные ветры, а температура воздуха не опускается слишком низко. Лето — холодное на островах и прохладное на континенте. В этот район входят берега и острова Баренцева моря и большей части Белого, а также полоса от севера Ладожского озера до Онежского залива. Интенсивные осадки здесь отсутствуют из-за малого влагосодержания воздуха, холодного даже летом.

Этот же экстремальный фактор характерен для четырех небольших районов Чукотки и севера Камчатки: Дежневского,

Корякского, Командорского и Хайрюзовского. Они находятся под влиянием циклонов, связанных с Алеутским минимумом. К ветрам в первых трех добавляются мощные снега. Диапазон средних температур самого холодного месяца здесь тот же, что и на крайнем северо-западе (от -13 до -22°C), лето — прохладное. Наконец, эти экстремумы наблюдаются на побережье Байкала, где сильные местные ветры усиливаются при прохождении циклонов. Зима, по сравнению с прилегающими районами Восточной Сибири, умеренная, а лето — прохладное. Осадков здесь также мало.

Единственные климатические экстремумы на юге северо-западной части Русской равнины (вдоль верхней Волги, выше Костромы) — осадки. Здесь они обусловлены атлантическими циклонами и конвективными процессами на холодных фронтах.

Наконец, только высокие температуры мы видим среди климатических экстремумов в Среднем Заволжье (от Камского устья до Саратова). Средние температуры июля здесь выше 20°C , абсолютные максимумы доходят до 39°C , осадков меньше 500 мм.

На большом пространстве континентальной Сибири сочетаются низкие температуры зимой и высокие летом при отсутствии сильных ветров и осадков. Нами выделено пять районов с этим сочетанием — лесостепи Западной Сибири, Тувинская котловина, низовья Ангары, Центральная Якутия и Южная Бурятия. Они находятся в зоне действия Сибирского антициклона. Средняя температура июля здесь почти всюду выше 18°C , с максимумами, приближающимися к 40°C , а средняя температура января меняется от -17°C в Тюмени до -43°C в Якутске. Амплитуда абсолютных экстремумов в Якутске больше 100°C .

Сочетание экстремальных холодов с экстремальными ветрами характерно для большей части Арктики, включая Ямаль-

ский нефтегазовый и Норильский рудоносный районы, Северный Урал, Васюганские болота и низовья Тобола в Западной Сибири, большую часть Чукотки, запад Корякского округа, горы Черского и Восточные Саяны. Нами выделено восемь таких районов. Лето в них преимущественно прохладное, годовых осадков от 160 мм на о.Визе до 550 мм в Воркуте и Норильске. В горах, в том числе в Путоранских, — мощный снежный покров.

Единственный район, где низкая температура сочетается с интенсивными (при летних циклонах) осадками (без других экстремальных климатических факторов), — Северо-Бурятский с его защищенными от сильных ветров прохладными летом котловинами.

Сочетание интенсивных осадков с сильными ветрами в отсутствие сильных морозов отмечается на побережье Тихого океана — на Камчатке, Курилах, Сахалине, Приморье. Здесь самый теплый месяц — август, с температурами ниже 17°C, кроме Приморья. Зимой же всюду выше -20°C. Годовые осадки больше 600 мм, а на Курилах даже до 1700 мм. Летом они обязаны муссонам, зимой — южным циклонам. Тем же набором экстремумов отличаются высоко- и среднегорная зоны северного склона Большого Кавказа. Оба эти фактора здесь способствуют сходу лавин. Интенсивные осадки выпадают зимой и летом при прохождении как средиземноморских, так и североатлантических циклонов. Сила ветра на больших высотах в горах усиливается за счет западного переноса. Примерно те же экстремумы, хотя и слабее выраженные, в трех районах на Русской равнине — Балтийском (с Санкт-Петербургом и Калининградом), Западно-Русском (со Смоленском) и Вятском. Здесь также интенсивные осадки сочетаются с бурными ветрами в атлантических циклонах при умеренных летних и зимних температурах.

Экстремально сильные ветры сочетаются с экстремально высокими температурами в Хакасии и на подверженном летним суховеям и зимним бурнам юго-востоке Русской равнины. Здесь везде меньше 400 мм осадков, средние же июльские температуры всюду выше 18°C, превышая в Астрахани 25°C. Зимы мягкие на Дону и Нижней Волге, но довольно суровые в Оренбуржье, Зауралье и Хакасии. Однако морозы там не превышают принятых нами критических значений.

Единственный район, где случаются только экстремальная жара и экстремально интенсивные осадки, — Приханкайская равнина, расположенная в муссонной области на Дальнем Востоке.

В прилегающем к Китаю обширном Амурском районе, включающем целиком Амурскую и Читинскую области, а также большую часть Хабаровского края, к летней жаре (в Хабаровске средняя температура июля на 3°C выше московской, а максимум достигает 40°C) и интенсивным муссонным осадкам добавляются суровые зимние холода. Дней с обильными осадками летом мало, они чередуются с сухими периодами. Поэтому случаются сильные наводнения и лесные пожары (например, летом 2000 г. вблизи Хабаровска), зимой же нередки морозы, достигающие, например, в Чите в среднем за январь -26°C (при абсолютном минимуме -47°C).

В трех изолированных друг от друга районах (Башкирии, Барабинских степях и полосе Центральной Сибири на восток от Красноярска до Ангары и Лены) экстремальная летняя жара и зимние морозы сочетаются с экстремально сильными ветрами, связанными с прорывами циклонов. Средние июльские температуры здесь примерно на градус выше московских, а январские на 5°C (Уфа), 15°C (Осетрово) ниже.

В Среднерусском районе, охватывающем, кроме Москвы, юг

Нечерноземья и весь Черноземный центр, сочетаются экстремальная жара (вспомним пожары на торфяниках в 1972 и 2002 гг.), интенсивные осадки и сильные ветры, в том числе смерчи на холодных фронтах. Те же типы экстремумов, включающие только особые холода, характерны для Северного Кавказа, Кузнецкого бассейна, Среднего и Южного Урала. На всей этой территории средние июльские температуры меняются от 15°C в Бисере до 23°C в Краснодаре, январские — от 6°C в Сочи до -19°C в Кемерово, годовые осадки — от 430 мм в Кемерово до 1550 мм в Сочи, но по набору климатических экстремумов эти районы близки.

Сильные морозы сочетаются с экстремально интенсивными осадками и ветрами, а также мощными снегами во внутреннем Сахалине.

Наконец, в двух близких районах — Верхнеангарском (включая Иркутск) и Ленском, согласно нашим критериям, выделяются все четыре вида экстремумов — летняя жара, зимние морозы, интенсивные осадки и сильные ветры. Вдоль правого берега Верхней Лены на наветренном склоне и в предполье Станового хребта накапливаются также мощные снега.

* * *

Итак, разнообразие природных условий России определяет существование на ее территории всевозможных наборов анализируемых климатических экстремумов, которые можно разделить на океаническую (в основном осадки и ветер) и континентальную (в основном низкая и высокая температура) группы. Наибольшее разнообразие типов и их мозаичность отмечаются при сочетании континентального климата с горным рельефом. Такие условия наблюдаются прежде всего на юге Сибири. Наиболее интенсивные экстремумы осадков отмечены вблизи Тихого океана и на Северном Кавказе, наибольшие темпера-

турные — в областях влияния Сибирского и Азорского максимумов давления.

Связи между климатическими экстремумами и чрезвычайными ситуациями могут быть достаточно сложными. Так, наводнение на Лене весной 2001 г. было вызвано не столько аномалиями снегонакопления, сколько продолжительными суровыми морозами, которые привели к необычному нарастанию толщины речного льда, сформировавшего заторы, и промерзанию

грунта, препятствовавшего впитыванию талой воды [8].

В условиях потепления последних десятилетий увеличивается число экстремально жарких дней, дней с интенсивными осадками и, по-видимому, с сильными ветрами. Число же экстремально холодных дней уменьшается быстрее, чем растет количество жарких. Соответственно меняются площади, на которых встречаются экстремумы, превышающие выбранные нами пороговые зна-

чения. Но судя по некоторым данным, эти изменения несущественны.

Заметим, что ограничения, которые накладывает мелкомасштабная карта, делают наше районирование пригодным лишь для ориентировочной оценки возможности чрезвычайных явлений. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 01-05-16374.

Литература

1. Кренке А.Н., Чернавская М.М. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2003. №2. С.17—23.
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер.3. Многолетние данные. Ч.1—6. Вып.1—34. Л., 1990.
3. Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Коршунова Н.Н. и др. // Метеорология и гидрология. 2001. №9. С.5—16.
4. Липовская В.И. СССР. Максимальные снегозапасы. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. СССР. М., 1997. Л.70.
5. Бышев В.И., Кононова Н.К., Нейман В.Г. и др. // ДАН. Т.384. №5. С.674—681.
6. Кильмянинов В.В. // Метеорология и гидрология. 2001. №12. С.79—83.

195-й рейс «ДЖОИДЕС Резолюшн»

И.А.Басов,

доктор геолого-минералогических наук

*Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН
Москва*

Этот рейс проходил в марте—мае 2001 г. в западной части Тихого океана под руководством М.Салисбюри (Геологическая служба Канады), М.Шинохары (Научно-исследовательский институт землетрясений, Япония) и К.Рихтера,

представителя Программы океанского бурения [1]. На глубинах от 1274 м до 5710 м вдоль профиля, пересекающего Филиппинское море от Марианского желоба на востоке до о.Тайвань на западе, пробурено 15 скважин, расположенных в трех точках (1200—1202).

Основной задачей 195-го рейса была установка в этом районе скважинных станций для долговременного мониторинга геологических явлений. Одна из них предназначена для изучения геохимических процессов в зонах субдукции, выяснения пространственных вари-

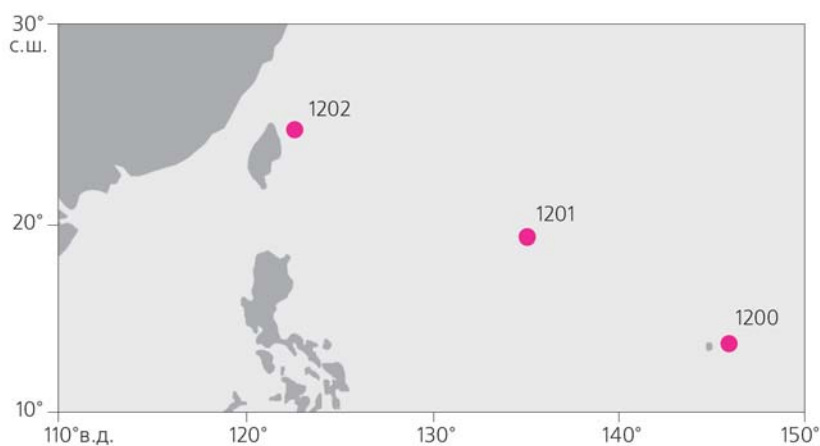
© И.А.Басов

аций поведения флюидов в погружающейся плите и биологической активности в глубинных породах. Эта станция установлена в скважине 1200, пробуренной непосредственно в жерле подводного грязевого вулкана на вершине горы Южная Чаморро к востоку от о. Гуам. Вторая — сейсмическая — в скважине 1201, в центральной части Филиппинского моря, стала частью Международной океанской сети, которая развертывается в последние годы с целью изучения структуры и динамики глубинных слоев Земли, а также сейсмичности [2]. Непосредственная задача этой обсерватории — изучение верхней мантии под морем и характера взаимодействия между литосферными плитами в западной части Тихого океана.

При установке обеих станций была получена важная информация о породах фундамента и строении перекрывающего его осадочного чехла. Образцы из скважины 1201 по составу оказались переходными между островодужными толеитами и базальтами срединных хребтов. Таким образом, формирование фундамента происходило в бассейне, отделенном от океана островной дугой. Отсутствие же карбонатных органических остатков в осадках, непосредственно перекрывающих базальты, говорит о том, что они изливались ниже глубины карбонатной компенсации. Хотя определений абсолютного возраста в рейсе не проводилось, палеонтологические данные показывают, что фундамент здесь вероятно древнее 35 млн лет, что согласуется с полученными ранее оценками.

Литература

1. *Salisbury M.H., Shinohara M., Richter C. et al.* Proceedings of the Ocean Drilling Program. Initial Reports. 2002. Leg 195.
2. *Басов И.А.* Результаты 191-го рейса «ДЖОИДЕС Резолюшн» // Природа. 2002. №10. С.25—26.



Положение скважин, пробуренных в 195-м рейсе «ДЖОИДЕС Резолюшн».

Вторая важная задача рейса — изучение относительно мелководных осадочных пород в районе, расположенном под теплым поверхностным течением Курисио, которое играет значительную роль в системе циркуляции водных масс в северо-западной части Тихого океана. Для бурения был выбран восточный склон о. Тайвань у южного окончания желоба Окинава, — одно из немногих мест, где накапливаются осадки с карбонатными планктонными микроорганизмами, необходимыми для датирования осадков.

В результате бурения здесь (скв. 1202, глубина воды 1274 м) получен осадочный разрез мощностью 410 м с остатками разнообразных планктонных и бентосных организмов с карбонатным скелетом. По мнению участников рейса, слагающий разрез терригенный материал поставлялся сюда в основном р.Янцзы. Предварительные оценки показывают, что вся толща осадков

имеет возраст менее 127 тыс. лет, а средняя скорость осадконакопления составляет около 3 м в 1 тыс. лет. Разрез непрерывен и относительно однороден, содержит остатки карбонатных микроорганизмов, необходимых для изотопных измерений, и имеет надежную палеомагнитную привязку. Поэтому при последующем изучении керна палеонтологическими, геохимическими и физическими методами можно получить высокое стратиграфическое разрешение (менее 100 лет). Это позволит сравнить здешние колебания различных параметров среды в течение позднего плейстоцена с аналогичными мелкомасштабными климатическими и океанологическими осцилляциями в других районах, в частности с циклами развития такого феномена, как Эль-Ниньо. По мнению участников рейса, анализ полученных материалов даст даже возможность проследить влияние климатических изменений на развитие китайской цивилизации. ■

Заметки и наблюдения Кедровые леса на месторождениях нефти и газа

В.А.Гладких

Ангаро-Ленская геофизическая экспедиция
г.Усть-Кут

Сибирская платформа — крупнейший на континентальной части России осадочный бассейн, с которым связывают большие перспективы добычи нефти и газа. В его пределах уже открыт ряд нефтегазовых районов — на территории Иркутской обл., Красноярского края и Республики Якутия.

Многие годы поиск углеводородов был связан с выявлением локальных поднятий, к которым бывают приурочены месторождения нефти и газа. Эту задачу успешно решали сейсморазведочные работы в совокупности с электроразведкой, гравитарезведкой и др. Но поиски так называемых неантиклинальных ловушек, где на первое место выходит литологический, а не структурный фактор, задача гораздо более сложная [1].

Как же обнаружить новые месторождения? Можно идти по пути резкой интенсификации дорогостоящего глубокого бурения: его эффективность (число скважин, приходящихся на продуктивную площадь) в последнее время возросла в отдельных районах до 30—40%. Или продолжать применение комплексных геофизических исследований. Но можно найти методы, способные существенно удешевить поиски неструктурных ло-

вушек. Нефтяное или газовое месторождение, характеризующееся аномально высокой концентрацией углеводородов, обуславливает нарушение физико-геологической однородности среды. Миграция газового потока на поверхность через трещины и разломы разуплотненных горных пород приводит к изменению геохимической обстановки в почвах и подпочвенных грунтах. От этого в свою очередь зависит усвоение растениями тех или иных веществ [2].

Как полевой геолог я много лет работал на различных нефтегазовых площадях и месторождениях Иркутской обл. В силу специфики геофизических исследований основное внимание уделялось документации взрывных скважин, т.е. составлению геологических разрезов. Но, кроме того, изучались и состав горных пород, и растительность, произрастающая на этих породах, а точнее почвенных грунтах, распространенных на поверхности. Мои исследования главным образом относятся к ареалам распространения кедров и их связи с нефтегазоносностью.

Сразу же оговоримся, что название «кедр» широко распространено и общепринято, однако научное его название — кедровая сосна сибирская (*Pinus sibirica*). Настоящие кедры — ливан-

ский, гималайский, атласский, кипрский — произрастают в Северной Африке, Гималаях, на Ближнем Востоке и на о.Кипр. Сибирская сосна встречается на северо-востоке европейской части России, в Западной Сибири, на Алтае, в Саянах, Забайкалье, южной части Якутии и на Дальнем Востоке. Кедр корейский (маньчжурский), или корейская кедровая сосна, распространен в Приморье и южной части Хабаровского края. Европейская кедровая сосна занимает незначительную площадь в карпатских лесах [3].

Несколько видов кедровой сосны сохранилось и на других территориях земного шара. Два из них установлены в Северной Америке (Скалистых горах), один — в Китае (провинция Шаньси), японская кедровая сосна растет на склонах горной цепи Иваширо, на островах Цусима и Хоккайдо.

Анализируя географию распространения кедровой сосны, можно заметить, что почти везде она связана с нефтегазовыми провинциями. На северо-востоке европейской части России — это Тимано-Печорская, за Уралом — Западно-Сибирская, в Карпатах — Карпатская, в Скалистых горах — Северо-Американская. Другие же районы, где произрастает кедровая сосна, можно отнести к пер-



Схема распространения кедровых лесов на Тирской (слева) и Купской нефтегазоносных площадях. Арабские цифры — номера скважин. 1 — кедровые леса; скважины глубокого бурения: 2 — пустые, 3 — с непромышленными притоками углеводородов, 4 — промышленные; 5 — смешанные лиственнично-сосново-еловые и осиново-березовые леса.

спективным. Так, Циньшуйский бассейн, расположенный в пределах Восточно-Китайской нефтегеологической провинции, находится между нефтегазоносными Ордовским и Северо-Китайским бассейнами и приурочен к упомянутой выше провинции Шаньси.

Посмотрим, в каком взаимоотношении углеводороды на территории Восточной Сибири, конкретно в Иркутской обл., находятся с кедровой сосной.

В большинстве случаев залежи нефти или газа, заключенные в осадочном чехле, соответствуют распространению кедра на поверхности. Причем наиболее перспективными объектами на нефть и газ становятся те, где он произрастает с пихтой, елью и лиственницей. Преобладание же лиственницы и сосны умень-

шает шанс обнаружения нефтегазоносных площадей. В качестве примера, где сегодня в изобилии присутствуют кедровые леса, можно привести такие месторождения, как нефтегазовое Даниловское, нефтегазоконденсатные Дулисьминское и Ковыктинское.

В пределах Непско-Ботубинской антеклизы ряд месторождений нефти и газа также располагается непосредственно в местах произрастания кедра. Практически все продуктивные скважины приурочены к зонам распространения кедровых деревьев. А в зонах, где такие деревья отсутствуют или находятся в резко подчиненном количестве, скважины давали непромышленные притоки углеводородов или вообще были пустыми. За редким исключением встре-

чались продуктивные скважины, связанные с березовыми и осиновыми лесами. Очевидно, нужно учитывать еще один важный фактор. Здесь раньше господствовали кедрово-темнохвойные леса. Березняки и осинники на многих тысячах гектаров водораздельной территории, между Жигаловским и Усть-Удинским р-нами Иркутской обл., скорее всего образовались после пожаров [2].

Связь месторождений углеводородов с кедром, помимо личных наблюдений, подтверждается и анализом материалов лесоустроительных работ [4]. При изучении документации глубокого бурения на Тирской и Купской площадях в Усть-Кутском р-не видно: из пяти пробуренных скважин на Тирской площади лишь одна (№104), рас-

положенная в южной части кедрового массива, оказалась промышленной. Все остальные, находящиеся за его пределами, — пусты. На Купской площади только скважина №143, пробуренная на краю кедрового леса, выдала полупромышленный приток газа, а №2 и №3, не входящие в его контур, оказались пустыми.

В 1987 г. в Жигаловском р-не открыто Ковыктинское газоконденсатное месторождение. Практически вся выявленная на сегодняшний день площадь расположена в обширнейших кедровых лесах. Нам еще ни разу не приходилось сталкиваться с такими громадными экземплярами сибирской сосны в этом районе. Некоторые деревья в диаметре у основания достигали 1.5 м. Во время разведки и эксплуата-

ции Ковыктинского месторождения было много проблем при отводе земель для размещения буровых и газотурбинных станций, линий газопроводов, дорожных магистралей. Такие реликты, конечно, требуют к себе осторожного и бережного отношения, особенно тогда, когда в освоение втягиваются громадные сибирские территории.

Таким образом, на начальном этапе, перед глубоким бурением, целесообразно использовать прямой поиск углеводородов по местам произрастания кедров. Его можно применять и при разведке для оконтуривания залежей. Финансовые затраты при этом несравненно ниже. Невольно напрашивается вопрос, для чего же проводить дорогостоящие геофизические работы, если можно привлечь ма-

териалы лесоустройства с кедровыми массивами и наметить контуры месторождений? Во-первых, для нефтяной геологии требуется знание строения осадочных бассейнов. Такие задачи успешно решаются при помощи геофизических исследований и параметрического бурения. Во-вторых, на первом этапе все же существует желание сравнить рекомендуемый поиск с результатами принятых и опробованных методов. В-третьих, мы не знаем, как связаны между собой объекты, выделяемые геофизиками (структуры, зоны, площади с нефтенасыщенными коллекторами и др.), с кедровыми аномалиями. Во всяком случае есть смысл связать исследования кедровых площадей с уже существующими методами поиска нефти и газа. ■

Литература

1. Анлонов С.В., Келлер М.Б., Лебедев Б.А. Сколько нефти осталось в российских недрах? // Природа. 2000. №7. С.35—42.
2. Вышемирский В.С., Симонова В.И., Симонов Н.А. // Геология и геофизика. 1991. №7. С.37—43.
3. Пермяков Б.Г. Кедр наш сибирский. Иркутск, 1986.
4. Схема Каймоновского комплексного леспромхоза Иркутской области. Масштаб 1:200 000, устройство 1984. Иркутск, 1984.

По мнению физиков Института Вейцмана (г.Реховот, Израиль), турбулентные движения в атмосфере способствуют выпадению дождей. Вихревые возмущения действуют внутри облаков подобно центрифуге, заставляя влагу быстро вращаться по расходящейся спирали. Ученые создали математическую модель для расчета скорости, с которой мельчайшие капли «сбиваются» в крупные, готовые к выпадению (учитываются скорость ветра, температура и влажность воздуха). Методика позволит существенно повысить качество метеопрогнозов. Sciences et Avenir. 2002. №670. P.52 (Франция).

По решению Международного союза охраны природы испанская рысь (*Felis lynx pardina*) внесена в список животных, находящихся под угрозой исчезновения. Этот подвид обитает лишь на отдельных, разрозненных территориях Испании и Португалии, в настоящее время его численность составляет всего около 600 особей (для сравнения: в 1978 г. этих животных насчитывалось 1000—1500). Sciences et Avenir. 2002. №670. P.16 (Франция).

Европейское космическое агентство приняло решение о более широкой подготовке

к высадке человека на Луну и Марс в 2030 г. Программа под названием «Аурога» находится в стадии планирования; в ней участвуют ученые и инженеры 15 стран Европы и Канада. Первым практическим шагом стал заказ оборудования для четырех непилотируемых миссий, в том числе роботов, которые будут установлены на космических аппаратах, а также марсоходов и приборов для доставки марсианских образцов на Землю. Это должно быть воплощено в жизнь к 2009 г. Проблемы финансирования проекта окончательно еще не решены. Science. 2002. V.298. №5593. P.515 (США).



Вращающаяся спиральная колонка в анализе природных образцов

П.С.Федотов, Т.А.Марютина

Жидкостная хроматография со свободной неподвижной фазой, вращающиеся спиральные колонки, планетарная центрифуга... На первый взгляд звучит весьма внушительно, но малопонятно. Однако, если разобраться, все не так уж сложно, как кажется, хотя сам хроматографический метод действительно необычен. Во-первых, обе несмешивающиеся друг с другом фазы — и неподвижная, постоянно пребывающая в разделительной колонке, и подвижная, непрерывно сквозь нее прокачиваемая, — жидкие. Никакого твердого носителя, или сорбента, на котором неподвижная фаза была бы закреплена, при этом нет. И тем не менее она удерживается — свободно скользит по стенкам, дробится на капли, увлекаемые потоком подвижной фазы, но из колонки не вымывается. Более того, при определенных условиях неподвижная фаза может занимать до 90% объема колонки. Невероятно! Как же это происходит, за счет каких неизвестных сил?

Прежде всего, за счет силы центробежной, ведь колонка вращается. Во-вторых, за счет известной всем силы Архимеда, выталкивающей одну жидкость из другой. Точнее, неподвижная



Петр Сергеевич Федотов, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского РАН.



Татьяна Анатольевна Марютина, кандидат химических наук, старший научный сотрудник того же института.

Научные интересы авторов — теория и методы разделения в аналитической химии, анализ токсичных веществ в объектах окружающей среды.

фаза «в свободном полете» удерживается в колонке благодаря постоянному противоборству архимедовой и центробежной сил.

Устройство, приводящее колонку во вращение, называется планетарной центрифугой (рис.1). Почему? Да потому, что катушка, на которую в один или несколько слоев намотана разделительная колонка (тефлоно-

вая трубка), вращается и вокруг своей оси, и вокруг центральной оси центрифуги — совсем как Луна вокруг Земли, с тем лишь отличием, что Луна шарообразная, а катушка цилиндрическая.

Планетарную центрифугу изобрел в начале 60-х годов американский ученый японского происхождения И.Ито. Метод разделения веществ, основанный на применении этого любо-

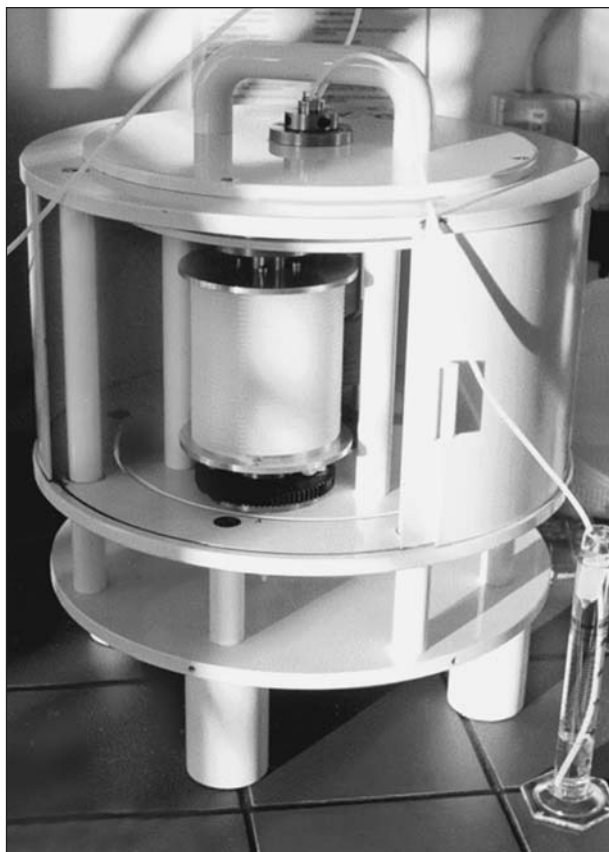


Рис. 1. Планетарная центрифуга с вертикально расположенной разделительной колонкой.

пытного устройства, он назвал противоточной хроматографией (*countercurrent chromatography*). Но на самом деле название не отражает суть процесса, поскольку противотока двух жидкостей во вращающейся спиральной колонке нет. Долгое время планетарные центрифуги в основном применяли в фармацевтической промышленности для выделения и очистки биологически активных органических веществ. Выделение нужных компонентов проводили в двухфазных системах, состоящих из воды и органических растворителей. Смесь растворенных веществ попадала в колонку с подвижной фазой и начинала взаимодействовать с неподвижной. В силу такого взаимодействия различные по физическим свойствам соединения продвигались по колонке с неодинаковой ско-

ростью и вымывались из нее с потоком подвижной фазы по очереди, т.е. отдельными зонами или, как принято говорить в хроматографии, пиками.

Метод жидкостной хроматографии со свободной неподвижной фазой развивается в нашем институте с 1986 г. Мы непосредственно участвовали в этом и показали, что вращающуюся спиральную колонку можно использовать для разделения не только органических, но и неорганических веществ. Однако в последнем случае одним отличием в физических свойствах никак не обойтись. Да и какое может быть вообще отличие по полярности и растворимости, к примеру, у ионов магния и кальция?! Следовательно, для разделения нужны химические взаимодействия. Поэтому в двухфазные жидкостные

системы стали добавлять особые соединения — экстракционные реагенты, по-разному взаимодействующие с близкими по свойствам неорганическими ионами. В целом системы для разделения неорганических веществ состоят из органического растворителя, содержащего экстракционный реагент (неподвижная фаза), и водного раствора минеральной соли или кислоты (подвижная фаза).

Используя подобную систему, мы разработали методику выделения элементов (в виде солевых растворов), концентрация которых в многокомпонентных смесях очень низка. Пример таких смесей — геологические образцы. В них содержание редких элементов, таких как цирконий, гафний, ниобий и тантал, на несколько порядков ниже, чем породообразующих элементов — кремния, алюминия, железа. Когда на фоне макрокомпонентов (их называют матричными или просто матрицей) приходится определять элементы, концентрации которых весьма низки, часто возникают сложности, даже если используются самые современные инструментальные методы анализа. Поэтому в ряде случаев приходится предварительно отделять микрокомпоненты от матрицы. Нам удалось успешно применить вращающуюся спиральную колонку для выделения Zr, Hf, Nb и Ta из растворов геологических образцов (рис.2). Через колонку с образцом последовательно пропускали подвижную фазу в виде трех водных растворов разного состава. Нужные элементы концентрировались в неподвижной фазе (растворе экстракционного реагента в хлороформе) и извлекались, когда через колонку проходили два первых раствора (смеси минеральных и органических кислот). В это же время вымывались из колонки матричные компоненты. А затем третьим раствором подвижной фазы (2 моль/л HCl) очищенные от матрицы редкие элементы извлекались из неподвижной фазы в ма-

лый (всего 7 мл) объем выходящего из колонки раствора (элюата). После промывания разбавленной азотной кислотой колонка, точнее неподвижная фаза, регенерировалась. И так, редкие элементы были выделены за одну стадию работы колонки, экстракционный реагент остался в ней в неприкосновенности, и планетарная центрифуга могла принять новую порцию геологического образца.

Ни один другой хроматографический метод не позволяет с такой легкостью извлечь из растворов микрокомпоненты при наличии макрокомпонентов в высоких концентрациях: все колонки с сорбентами, или твердыми носителями, при такой «жесткой эксплуатации» рано или поздно «забиваются» и перестают действовать. С планетарной центрифугой подобного не случается. Но это еще не все! Оказывается, вращающаяся спиральная колонка пригодна для работы не только с растворами, но и с твердыми, и гетерогенными образцами. Мы имели уже достаточный опыт в области жидкостной хроматографии со свободной неподвижной фазой, чтобы испробовать метод для разделения веществ и в таких образцах.

Прежде всего следовало изучить, как ведут себя гомогенные и гетерогенные среды в сложном асимметричном поле центробежных сил. Для этого необходимо было сначала разработать теоретическую основу и построить математическую модель, а затем опытным путем проверить способность неподвижной фазы в виде твердых гомогенных и гетерогенных природных образцов, таких как почвы и илы, удерживаться в колонке. На следующем этапе предстояло найти способ извлечения тяжелых металлов, находящихся в различных формах, а также токсичных органических веществ из почв и донных отложений — илов.

И в довершение всего мы предполагали заложить основы автоматизированной проточ-

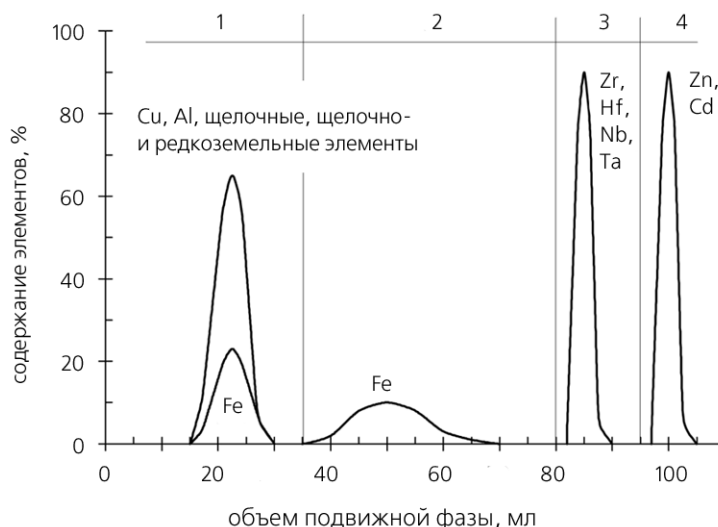


Рис.2. Хроматограмма, полученная при выделении циркония, гафния, ниобия и тантала общей группой из растворов геологических образцов. Неподвижная органическая фаза: 0.1 моль/л экстракционного реагента (тетраоктилэтилендиамина) в хлороформе. Растворы подвижной водной фазы: 1 — 0.1 моль/л соляной кислоты + 0.01 моль/л щавелевой; 2 — 0.1 моль/л соляной кислоты + 0.5 моль/л аскорбиновой; 3 — 2.0 моль/л соляной кислоты; 4 — 1.0 моль/л азотной кислоты.

ной системы, в которой вещества одновременно или последовательно выделялись бы из пробы, удерживаемой и диспергированной в центробежном поле.

Надо сказать, что во вращающейся спиральной колонке помимо архимедовой и центробежной сил на жидкости действуют силы межфазного поверхностного натяжения, вязкости, адгезии, гидравлического сопротивления. Как ведут себя в таких условиях обе фазы? Ответ дала новая концепция удерживания и перемешивания двух жидких фаз во вращающейся колонке, созданная при нашем участии. Отправной точкой в рассмотрении механизма удерживания неподвижной жидкой фазы послужил баланс перечисленных сил, который изменяется в зависимости от свойств жидкостей, особенностей конструкции планетарной центрифуги, скоростей вращения колонки и потока подвижной фазы. При разработке концепции были использованы довольно сложные математические вы-

кладки, которые не имеет особого смысла приводить здесь. Стоит, однако, подчеркнуть, что механизм удерживания неподвижной жидкой фазы работает и в системах, содержащих твердые частицы. Так что если взять вместо неподвижной жидкой фазы водную суспензию (ила, например), а органические растворители использовать как подвижную фазу, ничего принципиально нового не произойдет. Другими словами, поведение систем жидкость/твердое вещество—жидкость в основном укладывается в каноны поведения систем жидкость—жидкость.

Благодаря этому мы могли выделять токсичные органические соединения (пестициды, бифенилы, полиароматические углеводороды) из илов — сложных гетерогенных природных образцов. Если в качестве подвижной жидкой фазы использовался гептан, несколько компонентов образца вымывались из неподвижной фазы одновременно. При добавлении к гептану другого органического рас-

творителя — хлористого метилена — извлекались полиароматические углеводороды, причем последовательно, по мере увеличения концентрации последующего. С практической точки зрения групповое выделение полиароматических углеводородов в небольшую фракцию (5–6 мл) подвижной фазы более целесообразно, так как в дальнейшем можно разделить компоненты, идентифицировать каждый из них и определить его концентрацию с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Обычно извлечения полиароматических углеводородов и других загрязняющих окружающую среду веществ, опасных для здоровья человека, удается добиться в ходе сложного многостадийного процесса: образец просушивают, долго проводят омыление щелочью, экстрагируют целую группу соединений органическим растворителем, центрифугируют и, наконец, выделяют нужные компоненты методом абсорбционной хроматографии или каким-либо другим. Вращающаяся спиральная колонка дала нам уникальную возможность извлекать разные соединения из неоднородных природных образцов за один этап, без предварительной подготовки пробы. А это значительно облегчает эксперимент и уменьшает риск случайных ошибок.

Мы упомянули, что за счет одного и того же механизма во вращающейся колонке неподвижно удерживаются и жидкая фаза, и фаза в виде водной суспензии. Совсем иначе обстоит дело в системе жидкость—твердое вещество, когда неподвижной фазой служит измельченный образец почвы или осадочной породы, а подвижной — водные растворы. И в этом случае на содержимое вращающейся колонки действуют силы различной природы, но их баланс коренным образом отличается от того, который существует в системе жидкость—жидкость. Математические уравнения,

описывающие этот баланс, показывают, что вращающаяся колонка может удерживать твердую неподвижную фазу.

Это позволило нам изучать почву, загрязненные тяжелыми металлами. Известно, что по их общему содержанию вряд ли можно узнать, насколько они потенциально опасны. Если свинец, медь, кадмий или ртуть входят в состав минеральной матрицы почвы и прочно связаны с ней, они так и останутся в ней, не будут вымыты и не попадут в водоемы. И совсем иначе обстоит дело, если те же элементы содержатся в почве в легкодоступных (подвижных, доступных) или среднерастворимых формах. Последние могут высвободиться при незначительном изменении природных условий. Следовательно, чтобы оценить степень потенциальной опасности тяжелых металлов для окружающей среды, нужно знать, в какой форме они пребывают.

На практике приходится фракционировать разные формы элементов, которыми загрязнены почвы и осадочные отложения, трудоемким методом последовательного экстрагирования. А это значит, что несколько часов (иногда даже дней) измельченную пробу обрабатывают в стакане определенным водным раствором, затем фильтруют и центрифугируют, а раствор с извлеченными элементами анализируют. После этого оставшийся образец подвергают тем же манипуляциям еще несколько раз, меняя состав водного раствора. Существует немало схем последовательного экстрагирования, которые в той или иной степени моделируют изменения природных условий (в том числе сезонные) и дают возможность определить элементы в различных по доступности формах. Пожалуй, чаще других используется схема Тессье, которая позволяет выделить несколько водных фракций, содержащих элементы в разных формах.

Фракционирование во вращающейся спиральной колонке привлекательнее любой схемы. В экспериментах измельченный образец почвы стабильно удерживался в колонке при непрерывном пропускании через нее водных растворов солей, кислот и комплексобразующих реагентов, необходимых для последовательного экстрагирования разных форм элементов. Колонка объемом в 40 мл удерживала до 5 г образца!

Чтобы удостовериться в преимуществах планетарной центрифуги, мы сравнили степень извлечения наиболее доступных форм свинца, меди и цинка традиционным способом и непрерывным выщелачиванием во вращающейся колонке. Эффективность экстрагирования в ней оказалась более высокой. Это обусловлено тем, что образец почвы, удерживаемый в колонке, постоянно оmyвается свежим раствором, а в любой традиционной схеме он меняется только при переходе от одной стадии экстрагирования к другой.

Еще одно преимущество вращающейся колонки — кратковременность анализа: в проточном режиме он длится 4–5 ч (вместо нескольких дней, требуемых по схеме Тессье!). Потери образца при этом минимальны. Немаловажно и то, что весь процесс можно автоматизировать.

В соответствии с теоретическими выкладками, вращающаяся колонка способна не только удерживать твердые частицы, но и делить их по размеру и плотности. Эксперименты полностью подтвердили это. А зачем нужно фракционировать частицы? Токсичные органические вещества и микроэлементы находятся в природных водах и других объектах окружающей среды не только в виде ионов и растворенных низкомолекулярных соединений, но и могут быть связаны с макромолекулами, коллоидными и твердыми частицами. Не опре-

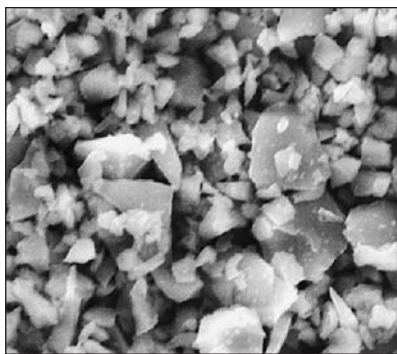
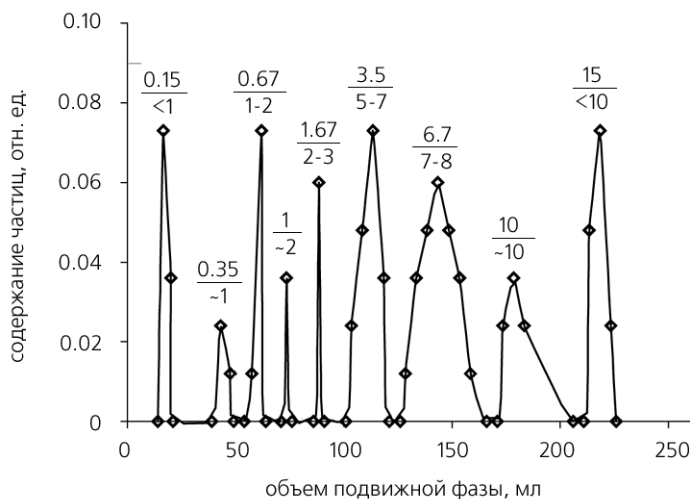


Рис.3. Частицы кварцевого песка размером 0.5–20 мкм в поле зрения электронного микроскопа.

делив, с чем именно связаны загрязняющие вещества, нельзя сказать, насколько они опасны и как будут себя вести в природных условиях. Например, станут ли тяжелые металлы или соединения мышьяка путешествовать по рекам? Или они спрячутся где-то на дне?

Фракционирование микро-частиц — совершенно нетрадиционная область применения вращающейся колонки. Это уже не хроматография, поскольку неподвижной жидкой фазы как таковой нет. Силовое поле, действуя на подвижную жидкую фазу, коллоидные и твердые частицы, обуславливает разные скорости миграции компонентов смеси вдоль стенок колонки. В данном случае планетарная центрифуга фактически представляет собой установку для фракционирования в центробежном силовом поле. В обычной (не планетарной) центрифуге имеется один узкий разделительный канал, который посредством вращающихся соединений связан с подводными трубками. В планетарной центрифуге нет вращающихся соединений, что снимает ограничения на давление в системе. Снимаются также ограничения и на массу образца, поскольку разделение происходит не в одном узком канале, а в спиральной колонке, чей объем можно менять, используя разное число витков и их слоев. Кроме того,

Рис.4. «Хроматограмма», полученная при фракционировании частиц кварцевого песка неправильной геометрической формы (размер 0.5–20 мкм). Скорость вращения колонки 90 об./мин; в числителе дроби над графиком указана скорость (мл/мин) потока подвижной фазы (воды); в знаменателе — размер выделяющихся частиц (мкм).



в планетарной центрифуге создается асимметричное и периодически меняющееся во времени силовое поле, характер которого зависит от соотношения радиусов вращения и обращения колонки, что может сыграть существенную роль при оптимизации процессов фракционирования.

Поведение частиц во вращающейся колонке мы изучили на примере шариков латекса и измельченных частиц природного кварцевого песка неправильной геометрической формы (рис.3). Оказалось, что разделить шарики не так уж сложно. А вот кварцевые частицы — объект совсем не простой! Справиться удастся, если ступенчато увеличивать скорость потока подвижной фазы (жидкости-носителя), оставив постоянной скорость вращения колонки (рис.4). По мере увеличения скорости потока из колонки вымываются частицы все большего размера (следовательно, большей массы). Заметим, взвесь кварцевого песка обычна в речных водах, поэтому фракционирование его может найти применение в анализе природных объектов.

Итак, вращающаяся спиральная колонка действительно может быть основой автоматизированной проточной системы и служить для разделения разных соединений (а иногда и частиц). Жаль, что в нашей стране планетарная центрифуга имеется пока в очень немногих лабораториях. Причина отчасти заключается в сложности изготовления этого, казалось бы, довольно простого устройства. Однако петербургский Институт аналитического приборостроения РАН в ближайшее время собирается освоить сборку пилотной модели планетарной центрифуги, а затем наладить серийный выпуск относительно недорогих приборов (они, кстати, должны превосходить западные образцы по ряду технических параметров). Хочется верить, что вскоре вращающаяся спиральная колонка станет обычной в российских научных учреждениях и исследовательских центрах. ■

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований. Проекты 00-03-32642, 01-03-06244.

Новости науки

Космические исследования

Предстоящие исследования Марса

Программы изучения Красной планеты, составленные в разных странах, выглядят весьма амбициозно¹. Они, в частности, включают намерение послать к Марсу каждые два года все более сложные орбитальные аппараты и посадочные отсеки; предполагается создать околomarсианскую систему связи для миссий, предусматривающих отправку образцов почвы и атмосферы на Землю. Все эти операции должны стать международными.

В 2003 г. НАСА планировало направить к Красной планете два аппарата с марсоходами, а Европейское космическое агентство — орбитальные и посадочные аппараты, разработанные в Великобритании. Независимо от них Япония уже ожидает прибытия на околomarсианскую орбиту своего космического аппарата. На 2005 г. НАСА намечает запуск аппарата с итальянским научным оборудованием, а в 2007 г. должен последовать марсианский спутник связи также итальянского изготовления. В этом же году ученые группы стран во главе с Францией собираются вывести в космос орбитальный марсианский аппарат и четыре малых спутника связи. На 2009 г. запланирован запуск аппарата, способного в следующем десятилетии доставить с Марса на Землю различные образцы.

Но все эти намерения находятся под угрозой. На конференции, проведенной НАСА в сентябре 2002 г., представители Италии не

исключили, что их страна может отказаться от обещания снабдить американский аппарат 2005 г. радиолокационным устройством, предназначенным для поиска воды (стоимость прибора около 20 млн долл.). Американский астробиолог Дж. Фармер (J. Farmer) подчеркнул, что это нанесло бы тяжелый удар по соответствующим исследованиям, тем более что заказывать другой прибор уже поздно.

Под сомнения попали и усилия Франции, являющейся головной страной в предстоящей в 2007 г. европейской миссии на поверхность Красной планеты — перерасход средств вынуждает французские власти сократить дальнейшие ассигнования, однако посадочные аппараты все же остаются приоритетными для французских ученых.

В то же время НАСА разрабатывает все более активную марсианскую программу. Помимо намеченного на 2003 г. запуска орбитального аппарата «Mars Express», на 2007 и 2009 гг. планируется высадка марсоходов типа «Exomars», на 2011 г. — пробная доставка на Землю образцов, а на 2015 г. — полномасштабная такая операция. Science. 2002. V.297. №5589. P.1972(США).

Астрофизика

Гамма-всплески — взрывы сверхновых?

Гамма-всплески — кратковременные импульсы жесткого излучения — были открыты в конце 60-х годов прошлого века. С тех пор наблюдения за ними ведутся практически непрерывно, но к определенным выводам об их природе астрономы так и не пришли. С большей или меньшей достовер-

ностью в конце 90-х годов удалось лишь установить, что гамма-всплески происходят далеко за пределами нашей Галактики, а значит, их природа связана с выделением колоссального количества энергии.

Из более чем сотни гипотез о происхождении гамма-всплесков наиболее живучими оказались две. Согласно одной из них, импульс жесткого излучения сопровождается вспышкой сверхновой типа Ib/Ic и образованием черной дыры в конце эволюционного пути этой сверхмассивной звезды. Согласно другой, гамма-всплеск происходит при слиянии компонентов в тесной паре нейтронных звезд. В природе, вероятно, реализуются оба механизма, но если о непосредственном наблюдении слияния нейтронных звезд можно только мечтать (разве что на помощь придут детекторы гравитационных волн), то в пользу связи гамма-всплесков со сверхновыми начали появляться реальные наблюдательные данные. Мощную поддержку эта гипотеза получила в конце 2001 г., когда признаки почти одновременной вспышки сверхновой были обнаружены сразу в двух гамма-всплесках.

Всплеск GRB 011121 был зафиксирован 21 ноября 2001 г. с помощью космического телескопа «Beppo-SAX» (Satellite per Astronomia X), принадлежащего Италии и Нидерландам. На протяжении следующих 10 дней яркость всплеска уменьшалась по обычному для таких источников степенному закону. Однако через 13 дней ослабление блеска во всех исследованных спектральных интервалах сильно замедлилось и даже, вероятно, на какое-то время остановилось: на кривой блеска по-

¹ См.: Снова на пути к Марсу // Природа. 2003. №3. С.75; Канада устремляется к Марсу // Там же. 2002. №3. С.20.

явился «горб», параметры которого оказались близки к параметрам кривой блеска сверхновой типа Ic.

Дж.Блум (J.Bloom; Калифорнийский технологический институт, США), П.Прайс (P.Price; Обсерватория Маунт-Стромло, Австралия) и их коллеги, обнаружившие «горб», предполагают, что породившая его вспышка сверхновой произошла либо одновременно со всплеском, либо (что более вероятно) за несколько (не более 10) дней до него¹. Предварительные указания на существование таких «горбов» получены уже для нескольких гамма-всплесков, но все они до сих пор основывались на крайне скудных и неоднозначных наблюдательных данных.

Еще одно доказательство генетической связи гамма-всплеска GRB 01121 с массивной звездой заключено в форме спектра послесвечения. Авторы работы проанализировали всю совокупность наблюдений GRB 01121 в оптическом, ИК- и радиодиапазоне и заключили, что параметры спектра послесвечения и характер их изменения со временем однозначно удается воспроизвести только в модели распространения ударной волны по среде со спадающей плотностью, но не по однородной или, скажем, клочковатой среде. В модели гиперновой этот результат вполне ожидаем. На сверхмассивных звездах в конце жизненного пути развивается мощный звездный ветер, и потому к моменту вспышки сверхновой (и предположительно к моменту гамма-всплеска) звезда окружена оболочкой сброшенного вещества, плотность которого в приближении сферической симметрии и постоянной скорости ветра спадает обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому, если гамма-всплеск действительно связан с окончанием эволюции массивной звезды, в его послесвечении должны быть видны признаки распространения ударной волны именно по среде со спадающей плотностью. Итак, у гамма-

всплеска GRB 01121 обнаружено сразу два независимых признака связи со сверхновой — собственно вспышка и плотное окружающее вещество, сброшенное в виде ветра звездой-предшественницей.

В одной из своих статей Блум, Прайс и их соавторы указали, что окончательным подтверждением гипотезы о сверхновой стал бы спектр послесвечения с характерными широкими линиями металлов (например, ионов Ca, Ti и Fe), которые рождаются в расширяющейся оболочке. И ждать такого спектра пришлось недолго! 11 декабря 2001 г. с помощью того же телескопа «Верро-SAX» был зафиксирован гамма-всплеск GRB 011211. В отличие от предыдущего источника для этого всплеска не удалось провести широкомасштабную наблюдательную кампанию с привлечением нескольких инструментов. Зато с помощью европейского космического телескопа «XMM-Newton» получены качественные его рентгеновские спектры. Как выяснилось, остаточное свечение гамма-всплеска рождается в веществе, приближающемся к наблюдателю со скоростью 0.086 с. В спектре видны линии многократно ионизованных магния, кремния, серы, аргона и кальция — типичных продуктов вспышки сверхновой, поэтому наиболее простое (и потому предпочтительное) объяснение наблюдательных данных состоит в том, что излучение рождается в оболочке сверхновой, вспышка которой произошла за несколько дней до гамма-всплеска (отсюда огромная скорость расширения оболочки).

© Д.З.Вибе,

кандидат физико-математических наук
Москва

Астрономия

Экзопланета со странностями

В июне 2002 г. было объявлено об открытии сразу 13 планет, находящихся вне Солнечной системы. Таким образом, число небесных тел, о существовании кото-

рых сравнительно недавно можно было лишь догадываться¹, уже почти достигло 90.

Есть среди них и такие, чьи свойства можно назвать неожиданными. Например, планета при звезде 55 Рака, в отличие от всех ныне известных экзопланет, отстоит от своего светила дальше, чем Юпитер от Солнца: 5.8 а.е. против 5.2 а.е. Новая экзопланета совершает полный оборот вокруг звезды за 14.8 земных лет; ее масса составляет не менее 4.3 массы Юпитера. Особенно необычно то, что у звезды 55 Рака известны еще две планеты, расположенные весьма близко к ней — одна всего в 0.12, другая — в 0.24 а.е. Каким образом они там оказались? И в какой мере подтверждают гипотезу, согласно которой несколько планет с массой и орбитой, близкими к земным, могут сосуществовать в одной и той же системе? Ведь принято считать, что юпитерообразные гиганты должны зарождаться на расстояниях не менее 3–4 а.е. от своего светила.

Д.Лин (D.Lin; Университет штата Калифорния в Санта-Круссе) и его коллеги высказывают предположение, что молодые гигантские планеты, следуя за обращающимся вокруг звезды и «сбъеживающимся» диском протопланетного вещества, заставляют это вещество своим приливным воздействием сдвигаться к центру системы.

Иная гипотеза у сотрудников Северо-Западного университета в Эванстоне, возглавляемых Ф.Разио (F.Rasio). Они предлагают сценарий «китайского бильярда», согласно которому при тесном сближении двух массивных планет одна из них выбрасывается на значительно более низкую орбиту, а другая — на более высокую относительно центральной для них звезды. Если верна первая, «миграционная», гипотеза, землеподобные объекты теоретически могут возникать после того, как гигантская планета по спирали продви-

¹ Bloom J.S. et al. // Astrophys. J. 2002. V.572. P.145; Price P.A. et al. // Ibid. P.151; Reeves J.N. et al. // Nature. 2002. V.416. №6880. P.512.

¹ См.: Сурдин В.Г. Каталог экзопланет // Природа. 2000. №7. С.20–21; Вибе Д.З. Каталог экзопланет пополняется // Там же. №11. С.84–85.

нулась внутрь системы, а часть вещества пока еще осталась в диске, обращаемом вокруг звезды. Если же справедлива «бильярдная» модель, взаимодействие между близкой и далекой от звезды планетами-гигантами должно привести к выбросу вовне любого сходного с Землей тела, оказавшегося на орбите между ними.

Сейчас под наблюдением находится около 1200 звезд, которые можно «заподозрить» в наличии своих планет. Через несколько лет мы узнаем, насколько вероятно во Вселенной существование объектов, сходных с Землей.

Science. 2002. V.296. №5575. P.1951 (США).

Астрономия

Новый «родственник» Юпитера

В середине июня 2002 г. Дж.Марси (G.Marsy; Университет штата Калифорния в Беркли) сообщил, что руководимая им группа открыла существование вне Солнечной системы некоего «аналога» Юпитера.

По совпадению, в тот же день швейцарские астрономы, возглавляемые М.Майором (M.Mayor; Женевская обсерватория в Северни), объявили, что обнаружили обращающуюся вокруг звезды HD 190360 планету, которая значительно более «родственна» Юпитеру, чем любая иная.

Установлено, что масса этой новооткрытой планеты составляет лишь 1.1 юпитерианской, а орбита проходит в 3.7 а.е. от звезды. Будь эта планета членом Солнечной системы, она находилась бы где-то за Марсом, между поясом астероидов и Юпитером. Эксцентриситет ее орбиты — менее 0.1, что делает ее еще более сходной с юпитерианской. Но вот что важнее: при звезде HD 190360, по-видимому, вовсе нет «горячих Юпитеров». Доплеровское смещение излучения от этой системы говорит, что для находящихся там гипотетических инопланетян наша Солнечная система должна выглядеть так же, как их система — для

земного астронома. Все это делает вероятным открытие вне Солнечной системы планет, более или менее сходных с Землей.

Science. 2002. V.296. №5576. P.2124 (США).

Планетология

Ранняя история Земли: образование коры и мантии

Изотопная система $^{176}\text{Lu}/^{176}\text{Hf}$ уже неоднократно применялась для выяснения вопросов ранней дифференциации Земли, приведшей к образованию мантии и коры. Однако интерпретация полученных данных требует точного знания константы распада (λ) изотопа ^{176}Lu , равно как и некоторых других параметров, характеризующих состав планеты в целом. Использование недавно уточненного значения $\lambda^{176}\text{Lu}$ позволило установить присутствие нерадиогенного гафния в земных цирконах (ZrSiO_4), возраст которых превышает 3.9 млрд лет. Это в свою очередь говорит о том, что выделение корового материала из мантии происходило 4.3 млрд лет назад. Но доказательства обеднения мантийного материала гафнием до сих пор получены не были.

Группа датских космохимиков во главе с М.Бизаро (M.Bizzarro; Геологический музей и Центр литосферы Дании) изучала отношения изотопов Lu и Hf в различных типах метеоритов и определила первичное отношение $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ с большой точностью: 0.279628 ± 0.000047 . Полагая возраст примитивного метеоритного вещества равным 4.56 млрд лет, ученые рассчитали значение $\lambda^{176}\text{Lu} = 1.983 \pm 1.033 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$. Такая величина $\lambda^{176}\text{Lu}$, по мнению исследователей, показывает, что наиболее древние земные минералы образовались из мантийного расплава, уже обедненного гафнием. Формирование подобного расплава должно было завершиться не позднее 320 млн лет после аккреции Земли, что полностью согласуется с временными оценками,

полученными при изучении продуктов распада ныне вымерших короткоживущих радионуклидов в метеоритах.

Nature. 2003. V.421. P.931–933 (Великобритания).

Физика атмосферы

Серебристые облака смещаются к югу

Серебристые облака образуются в атмосфере обычно выше 80 км над Землей и видимы в сумерки, после захода Солнца. Первооткрывателем их в 1885 г. был наш соотечественник астроном В.К.Цераский (1849–1925). В том же году американец Р.Лесли (R.Leslie) опубликовал в журнале «Nature» сообщение: «В понедельник 6-го, около 10 часов вечера на ясном сумеречном небе появилось море светящихся волнистых облаков, одинаковых по тону и цвету... По форме они были волнообразными и, очевидно, очень высокими, наверное, освещаясь солнцем». Впоследствии это явление наблюдали многие жители Севера, населяющие районы за 55°с.ш. (для нашей страны — к северу от Петербурга, Екатеринбург, Красноярск и т.д., для Северной Америки — от юга Аляски и Канады до географического полюса).

Но в последние годы серебристые облака стали видимы и на десятках градусов южнее обычного, т.е. в полосе Мадрид—Рим—Закавказье—Средняя Азия—Пекин. Ученые предположили, что это связано с глобальными климатическими изменениями, отражающимися и в верхней атмосфере.

Специалисты по химии атмосферы называют несколько возможных путей возникновения серебристых облаков: это результат либо увеличения концентрации CH_4 и CO_2 в верхних слоях воздушной оболочки Земли; либо вследствие похолодания в высокой атмосфере, связанное с потеплением нижней; либо, наконец, появление масс влаги при участившихся запусках ракет. Нерешенные проблемы вызвали к жизни международный проект AIM (Aeronomy

of Ice in the Mesosphere — Аэрономия льда в мезосфере), рассчитанный на шесть лет. Финансирует проект НАСА США. На борту одного из американских искусственных спутников Земли, который предполагается запустить в 2006 г. с авиабазы Ванденберг в штате Калифорния, будут установлены, в частности, четыре комплекта приборов для сбора информации о серебристых облаках.

Ученые надеются решить, наконец, давнюю проблему происхождения этого явления и выяснить причины его смещения к югу. *Geophysical Institute Quarterly*. 2002. V.18. №1. P.1 (США).

Физика

Длинные нити из нанотрубок

Уникальные механические свойства отдельных углеродных нанотрубок¹ могут использоваться пока только в пределах нанодиапазона. Однако в некоторых случаях необходимы непрерывные нити и ленты из большого числа ориентированных трубок. В 2000 г. французские исследователи во главе с Б.Виголо² впервые разработали простой метод получения жестких волокон и лент из одностенных ориентированных трубок. Он основан на свойствах системы нанотрубки—вода—поверхностно-активное вещество. Исходный материал — пучки из нескольких трубок — помещали в водный раствор поверхностно-активного вещества (ПАВ), которое адсорбировалось их поверхностью. При определенной концентрации ПАВ электростатическое отталкивание уравновешивало ван-дер-ваальсовы силы притяжения и образовывалась суспензия. С помощью шприца ее медленно вводили в поток раствора полимера, помещенного во вращающийся цилиндрический сосуд. Нанотрубки ориентировались главным образом

в направлении вращения, образуя длинные ленты с поперечным сечением, величина которого зависела от диаметра иглы шприца и от скорости вращения. При удалении полимера со дна контейнера формировались спиральные ленты длиной до 1 м с ориентацией трубок преимущественно вдоль ленты.

Этот процесс может быть использован для производства шнуров из тысяч прочных волокон. Несмотря на использование неочищенного исходного материала, модуль упругости полученных волокон очень высок — 15 ГПа. Улучшить их и без того хорошие механические свойства можно, еще более увеличив степень ориентации.

Группа китайских ученых под руководством Кайли Дзянга³ избрала другой путь: пучок параллельных нанотрубок «выдергивали», как шелковую нить из кокона, из выращенного на кремниевой подложке массива высотой несколько сотен микрометров. Полученные нити выглядели, как тонкие ленты из параллельных прядей длиной до 30 см и диаметром несколько сотен нанометров; ширина ленты зависела от числа прядей. По оценкам ученых, из 1 см² массива можно вытянуть 10 м нити. После соответствующей термической обработки из такой пряжи можно сделать, например, ткань для пуленепробиваемых жилетов или материал, блокирующий электромагнитные волны.

Для демонстрации широких возможностей нанотрубных волокон Дзянг с коллегами сконструировали лампу накаливания с изготовленной из них спиралью, которую закрепили между двумя металлическими контактами. Провод светился в вакууме ($5 \cdot 10^{-3}$ Па) при постоянном напряжении 70 В на протяжении 3 ч; за это время его проводимость увеличилась на 13%, а натяжение возросло с 1 до 6.4 мН. Возможно, это связано с высоким сопротивлением контакта металл—нанотрубка, приводящим к сильному перегреву места соединения.

Исследователи изготовили также поляризатор, составленный из параллельных нанотрубных волокон. При пропускании луча света через него проходят лишь фотоны, поляризованные перпендикулярно пучку нанотрубок, а поляризованные вдоль его оси — поглощаются. Поскольку диаметр трубок ≈ 10 нм, поляризатор может работать в ультрафиолетовой области спектра при длине волны излучения до десятков нанометров.

http://perst.isssp.kiae.ru/inform/perst/2_2/index.htm

Молекулярная электроника

Проводимость молекулы водорода

В последние годы быстрыми темпами развивается молекулярная электроника, в которой функции переключателей, диодов и других элементов выполняют отдельные молекулы. Использовать для управления ими сканирующий туннельный микроскоп удобно только в лабораторных условиях, на практике же управляющий сигнал гораздо предпочтительнее подавать через связь металл—молекула—металл. Правда, при этом трудно определить, действительно ли контакт формируется одной-единственной молекулой.

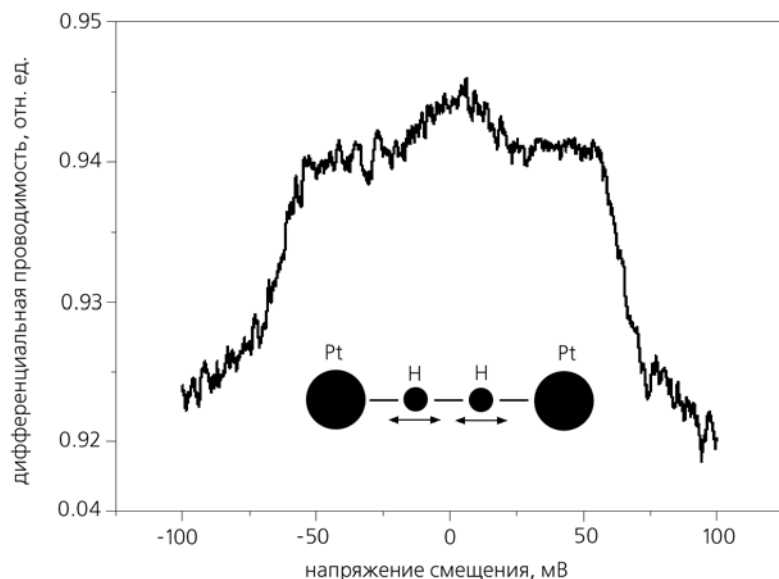
Голландские физики из Лейденского университета совместно с американскими коллегами из компании IBM изготовили устойчивый мостик между платиновыми электродами из одной (!) молекулы водорода¹. Об этом свидетельствует тот факт, что проводимость водородного мостика оказалась почти в точности равной кванту проводимости $G = 2e^2/h$ — в отличие от результатов, полученных ранее другими учеными для органических молекул.

Анализ показал, что проводимость этого молекулярного контакта осуществляется преимущественно через возбужденную антисвязывающую орбиталь молекулы H₂ (нижняя связывающая орбиталь заполнена двумя электрона-

¹ Подробнее о нанотрубках см.: Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки — материалы для компьютеров XXI века // Природа. 2000. №11. С.23—30.
² Science. 2000. №5495. V.290. P.1331—1334.

³ Nature. 2002. V.419. №6909. P.801.

¹ Nature. 2002. №6910. V.419. P.906—909.



Проводимость водородного мостика (дана в квантах проводимости) в зависимости от напряжения.

ми). Что удивительно, расстояние между атомами водорода при этом оказывается практически таким же, как и в свободной молекуле H_2 , несмотря на то, что между каждым атомом водорода и ближайшим к нему платиновым электродом устанавливается очень прочная связь. Иными словами, хотя «водородные электроны» и обеспечивают сцепление молекулы H_2 с электродами, они продолжают участвовать в ковалентной связи между атомами водорода в самой молекуле; причем связь Н–Н прочнее связей Pt–Н — именно они рвутся первыми при растягивании контакта.

http://perst.isssp.kiae.ru/inform/perst/2_2_1/index.htm

Охрана природы

Амазонии требуется защита

По мнению международных природоохранных организаций, для надежной защиты среды обитания должны быть изъяты из числа подлежащих вырубке 10–12% площади тропических лесов.

Бразилия — одна из наиболее богатых природными ресурсами

стран мира — в то же время чрезвычайно слаба экономически. Правительство разработало обширный план «Бразилия, вперед!»¹, куда вошли и меры по охране окружающей среды. В первую очередь они касаются Амазонии, где вырубка тропических лесов поставила под угрозу само их существование. К 2001 г. под контроль было взято более 1 млн га (в 1993 г. таких территорий практически не было), но к ним нужно отнести еще по крайней мере 0.3 млн га.

По рекомендации специалистов охраняемые участки (как существующие, так и планируемые) соединяются «коридорами» для передвижения животных. Проводится подразделение лесов на контролируемые в федеральном масштабе (национальные) и подчиняющиеся правительствам штатов. Местные власти, часто обвиняемые в коррупции, от контроля отстраняются. Статус национальных пока имеют 28% лесов, но к 2010 г. его решено придать еще 15% Бразильской Амазонии, что составляет 50 млн га (единственной сравнимой по масштабу

¹ Каково будущее Амазонии? // Природа. 2001. №10. С.82.

акцией была организация в 1908 г. системы национальных парков США). По предварительным подсчетам, создание 1 га нового национального леса обойдется бюджету страны в 1.4 долл. США, а всего потребуется около 70 млн долл.

Если предпринимаемые усилия увенчаются успехом, Бразилия займет достойное место среди стран, уделяющих необходимое внимание защите и возобновлению естественных ресурсов. Возможно, такому примеру последуют и другие государства на территории Амазонии — Боливия, Перу и Венесуэла.

Science. 2002. V.297. №5586. P.1478 (США).

Геология

Что случилось три миллиарда лет назад?

За последние 20 лет накопилось немало свидетельств того, что в геологической истории Земли неоднократно случались столкновения с крупными небесными объектами, и каждое из таких столкновений изменяло как поверхность планеты, так и ход эволюции живых организмов на ней. Однако за истекшие миллионы и миллиарды лет эрозия стерла с лица Земли большую часть следов таких катастроф, что сильно затрудняет непосредственное изучение самих событий и их последствий.

Изотопное датирование образцов лунных пород, подвергшихся когда-то мощным ударам, показало, что естественный спутник нашей планеты, как и она сама, был мишенью интенсивнейшей «бомбардировки» из космоса примерно 3.8 и 3.2 млрд лет назад. На Земле следов первой из этих катастроф пока не найдено, зато следы событий, происходивших 3.5–3.2 млрд лет назад, запечатлелись по крайней мере в четырех крупных слоях, которые найдены в Барбертонском поясе диоритов, диабазов и других зеленокаменных пород в провинции Трансвааль (запад ЮАР). Их изучали американские геологи и геофизики из Университета штата

Луизиана в Батон-Руже и Стэнфордского университета (штат Калифорния) под руководством Г.Р.Байерли (G.R. Bayler).

Как и аналогичные слои, отложившиеся в Восточно-Пилбарском блоке (штат Западная Австралия), они представляют собой древнейшие среди известных на Земле вулканогенно-осадочные породы, по которым судят о происхождении земной коры и начальных периодах возникновения жизни. Исследователи изучили и сопоставили цирконы ($ZrSiO_4$) из пород ЮАР и Западной Австралии. Эти породы несут отчетливые следы многократного воздействия мощных цунами, вторгавшихся практически одновременно с падением весьма крупного небесного тела. Только в одном из образцов массой около 2 кг обнаружено 30 цирконов диаметром от 50 до 100 мкм. Рыхлые осадочные породы, в которых найдены и африканские, и австралийские цирконы, скорее всего порождены цунами, а не сильным ударом астероида.

На основании анализа соотношений изотопов $^{207}Pb/^{206}Pb$ определено, что возраст африканских цирконов 3470.1 ± 1.9 млн лет, а австралийских — 3481 ± 2 млн лет. Таким образом, возникновение этих пород весьма близко по времени.

Исследователи пришли к выводу, что космическая катастрофа, произошедшая на Земле в начале архея, была почти глобальной и в энергетическом отношении в 10–100 раз мощнее, чем более известная, случившаяся на границе мелового и третичного периодов. Она вызвала беспрецедентную по своим масштабам волну цунами. Это не могло не изменить ход геологической и биологической истории планет в целом.

Science. 2002. V.297. №5585. P.1233 (США).

Геология. Океанология

Кому достанется сокровища шельфа?

Площадь континентального шельфа составляет около 15 млн km^2 и примерно 5% площади Ми-

рового океана, но потенциальные богатства шельфа значительно больше этой доли — здесь кроются огромные резервы источников энергии, минерального и биологического сырья.

В 1982 г. ООН приняла Конвенцию о морском праве, которая предоставляет 151 государству, имеющему выход к морю, Исключительную экономическую зону — 200 морских миль (1 морская миля = 1.852 км) от уреза воды. Во многих регионах эта зона перекрывает весь шельф. В случаях, где этого нет, Конвенция позволяет соответствующей стране претендовать на большую территорию. Но прежде необходимо точно установить, где заканчивается континент и начинается морская бездна, а также устранить неизбежные разногласия в методике определения такого предела. Специалисты полагают, что получателями добавочных площадей смогут стать примерно 60 стран. Среди них, например, Новая Зеландия, претендующая как островное государство на 2 млн km^2 шельфа, что удвоило бы ее морские владения. Индия может получить до 1 млн km^2 , а США, по первоначальным прикидкам, будет претендовать на суммарную площадь около 750 тыс. km^2 в Атлантическом, Тихом и Северном Ледовитом океанах, где залегают полезные ископаемые оценочной стоимостью до 1.3 млрд долл. Россия же претендует почти на половину всего дна Северного Ледовитого океана.

Уже сейчас очевидно столкновение юридических и научных аспектов проблемы, ибо международные соглашения и правила зачастую неясны, а то и противоречивы. Специалист по геологии моря Д.Монахан (D.Monahan), глава канадской комиссии по проблемам шельфа, считает необходимым выработать общую научную интерпретацию получаемых данных. Свои заявки большинство государств должны подать в ООН к 2009 г., при этом обязаны составить подробную документацию, касающуюся глубины моря, очертаний дна, мощности осадочного

слоя и других параметров. Небогатые страны опасаются, что из-за дорогостоящих работ по съемке и картированию морского дна не сумеют этого сделать даже в указанные сроки.

Объективные трудности связаны с определением границ континентального шельфа — ведь в действительности топография морского дна часто отличается изрезанностью рельефа, и поэтому на основании одной и той же информации можно делать противоположные выводы. Измерения мощности осадочных слоев с запасами нефти и газа тоже непостоянная задача. По существующему международному праву государственные границы в море проходят там, где толща осадков становится маломощной, но здесь теряется четкость интерпретации отраженного акустического сигнала. Если, например, расплавленные породы внедряются в более древний осадочный комплекс, перед исследователем возникает ложное дно, что искажает подлинную мощность осадочного слоя, к тому же он далеко не всегда становится тоньше по мере удаления от берега. Однако наибольшие разногласия связаны с подводными хребтами: являются ли они продолжением континентальной коры, т.е. отходят от сухопутной территории того или иного государства, или же образованы океанической корой. Наконец, крупное скопление осадочных пород на дне может оказаться результатом схода оползня или сброса с континентальной окраины моря.

Начатый сбор научной информации, необходимой для установления Исключительных экономических зон, вызывает в научном сообществе оптимизм, связанный с надеждами на новые открытия. Достаточно упомянуть целую цепь ранее не известных подводных вулканов и глубоко врезанных в дно каньонов у побережья Новой Зеландии или следы мощных подводных оползней, обнаруженных у северных берегов США.

Science. 2002. V.298. №5600. P.1877 (США).

Вулканология

Килауэа жжет заповедные леса

Извержения самого активного вулкана Гавайских о-вов — Килауэа — продолжают десятилетиями. О них упоминается еще в древних легендах полинезийских народов, а с 1820 г. они регулярно фиксируются в письменных источниках европейско-американских поселенцев. Даже в краткие периоды относительного затишья в его вершинном кратере не переставало бурлить озеро раскаленной лавы.

По геологическим данным, этот кратер возник на несколько этапов на протяжении последних 1.5 тыс. лет; в XVIII в. вулкан образовал крупные разломы — две рифтовые зоны, простирающиеся до самых морских берегов. Около 90% поверхности Килауэа сложено лавой, возраст которой менее 1.1 тыс. лет, а 70% — моложе 600 лет. Во время последнего мощного извержения, начавшегося в 1983 г., лавовые потоки заняли более 100 км², уничтожив свыше 200 домов. Май 2002 г. отличался частыми длиннопериодными землетрясениями. Еще в конце апреля земная поверхность вокруг кратера Пу'у О'о резко опустилась, однако вскоре стала опять подниматься, что сопровождалось серией хотя и слабых, но повторявшихся каждые 30 с толчков; через месяц этот рой землетрясений внезапно оборвался.

В ходе облета вершины (общая высота горы 1222 м над ур.м.) 24 апреля 2002 г. ученые увидели яркое свечение над ранее спокойной местностью вокруг кратера Пука-Нуи. В тот же день поток свежей лавы перелился отсюда в близлежащий кратер Пу'у О'о. Соединившиеся между собой лавовые реки достигли заповедных лесов Гавайского национального парка, которые во многих местах воспламенились. К июню 2002 г. полностью выгорело более 1 тыс. га леса.

Извержение продолжается. Незычные наблюдения сотрудников

Гавайской вулканологической обсерватории, основанной в 1912 г., делают Килауэа одним из наиболее изученных вулканов на Земле.

Bulletin of the Global Volcanism Network. 2002. V.27. №5. P.6 (США).

Палеоклиматология

История климата Африки — в снегах Килиманджаро

Климатические условия в тропиках постоянно колеблются в разнообразных временных масштабах — от межгодовых (например, в 1997—1998 гг. под влиянием Эль-Ниньо — Южной осцилляции) до тысячелетних (как было между дождевыми лесами Сахара). Однако палеоклиматическая информация для тропических областей пока скудна. Этим объясняется интерес к работе группы гляциологов и палеоклиматологов во главе с Л.Дж.Томпсоном (L.G.Thompson; Университет штата Огайо), в состав которой вошли сотрудники Университета штата Массачусетс, Швейцарского федерального института наук о среде, а также В.Н.Михаленко из Института географии РАН (Москва).

Эти ученые исследовали состав колонок льда, полученных ими же в 2000 г. на вершине и верхних склонах Килиманджаро (3° ю.ш., 37° в.д.; высота над ур.м. 5893 м; возраст вершинного ледника 11.7 тыс. лет). Важно, что этот высочайший на континенте пик лежит вблизи экватора, в области влияния восточноафриканских муссонов. В колонках льда представлен почти непрерывный ряд атмосферных осадков, которые с высокой степенью разрешения фиксируют климатические условия в промежутке от 11.5 тыс. лет назад до настоящего времени. Изменения изотопного состава кислорода в образцах льда говорят о колебаниях температуры; содержание различных пылевых частиц свидетельствует о кратких, но сильных вулканических извержениях, о наступлении засушливых периодов и т.п.

Все эти данные позволили выделить в тысячелетнем масштабе времени две основные климатические фазы: теплую и влажную между 11 и 4 тыс. лет назад и относительно холодную и засушливую в последние 4 тыс. лет. На эти общие тенденции накладываются резкие изменения климата в десяти- и столетних масштабах. К сожалению, малое количество органики в кернах не позволяет определить абсолютную хронологию слоев (например, их возраст в основании колонок устанавливался путем сравнения со спелеологическими данными из пещер Восточного Средиземноморья; одним из хронологических параметров для верхнего слоя послужило изменение концентрации изотопа ¹⁸O). Тем не менее авторы считают установленным, что во время малого ледникового периода (примерно 1270—1850 гг.) в Экваториальной Африке, как и в Европе, заметно похолодало. Это отразилось на гидрологических условиях всей Восточной Африки и западной части Индийского океана.

Анализ, проведенный авторами, подтвердил и уже известные факты: действительно, примерно 8300, 5200 и 4000 лет назад этот регион охватывали жесточайшие засухи. Одна из них, около 8300 лет назад, соответствует краткому периоду похолодания в высоких широтах на Севере. Тогда же в глобальных масштабах уменьшилась концентрация метана в воздушной оболочке Земли. Недавний анализ изотопного состава сталагмитов в пещерах Омана (Аравийский п-ов) показал большую концентрацию ¹⁸O, что, по мнению ученых, говорит о снижении в тот период интенсивности муссонных осадков. Уменьшение количества изотопа ¹⁸O, произошедшее 6500—5200 лет назад, указывает на существенное похолодание. Увеличение влажности, падение температуры и наступление ледника в середине голоцена в экваториальной области Восточной Африки устанавливается ныне по характеру растительной пыльцы и осадкам на дне озер. Быстрое похолодание и иссушение

климата около 5200 лет назад знаменовало окончание периода африканской увлажненности в северной части тропиков.

Относительное влияние температуры и атмосферной циркуляции на изотопные характеристики ледовых кернов пока еще не совсем понятно. Более точное понимание соотношений этих факторов специалисты возлагают на недавно образованную Глобальную сеть данных об изотопном составе осадков, которая создана при поддержке Международного агентства по атомной энергии и Всемирной метеорологической организации (Женева).

Гляциологи с сожалением предполагают, что уникальные образцы ледового керна, добытые на Килиманджаро, могут оказаться последними. Если современные климатические тенденции не изменятся, льды и снега Килиманджаро через 15–20 лет вообще исчезнут¹. Это повлекло бы тяжелейшие последствия для населения, лишаящегося достаточного количества воды — как питьевой, так и для хозяйственных и промышленных целей.

Science. 2002. V.297. №5581. P.528, 596; V.298. №5593. P.548, 589 (США).

Палеонтология

Четырехкрылый планёр из мезозоя

Китайские палеонтологи удивили мир описанием невиданного оперенного динозавра, найденного в нижнемеловых отложениях (слоях джехоль) на западе провинции Ляонин². Это небольшое существо длиной около 77 см, из которых две трети составлял хвост, имело летательные перья не только на передних конечностях, но и на задних лапах! Поэтому авторы описания полагают, что нашли динозавра с крыльями на передних и задних конечностях, и его можно считать промежуточной стадией на

пути формирования настоящего птичьего полета, который, в данном контексте, сформировался по гипотезе «с деревьев — вниз». Наземную гипотезу происхождения полета — «с земли — вверх» — можно теперь, по их мнению, оставить. Перья на передних и задних конечностях были коротки, чтобы обеспечить машущий полет, хотя достаточны для планирования. На передней конечности их длина достигала 222 мм, на задней — 194 мм. Конец хвоста тоже был снабжен перьями длиной 105–120 мм. Мелкое оперение (25–30 мм) просматривается на туловище и голове, а на затылке перья удлинены до 40 мм в виде хохла. Второй палец лапы имел крупный серповидный коготь, очень характерный для дромеозаврид (Dromeosauridae). И по ряду других продвинутых признаков новая форма включается в это семейство тероподных динозавров.

Четырехкрылый дромеозаврид описан как новый вид рода микро-рапторов — *Microraptor gui*. Три других неполных экземпляра оперены только как *Microraptor* sp., а еще один — как *Dromeosauridae* gen. et sp. indet. После скандальной истории с археоптеротором, который оказался химерой, составленной из передней части скелета птицы и задней части скелета дромеозавра, не исключается возможность и новых подделок³. Авторы статьи о новом микро-рапторе сканировали скелет на томографе и убедились в его аутентичности.

Длинные перья на задних лапах, вероятнее всего, связаны с планированием: видимо, микро-раптор расставлял оперенные ноги в стороны, чем заметно увеличивал несущую поверхность тела. Именно так он изображен на реконструкции в «Nature», но горизонтальное разведение ног вызвало возражения у многих специалистов, оценивавших находку⁴. Бедро у динозавров, как,

впрочем, и у птиц, не может отводиться в сторону. Оно движется только вперед-назад, в одной плоскости. С учетом этого выдвинуты соображения об использовании оперенных ног в качестве рулей, что тоже выглядит маловероятным.

Microraptor gui — первый летающий оперенный динозавр. После 1996 г. было описано не менее семи форм тероподных динозавров из нижнемеловых отложений Китая; они имели перообразные или пуховидные покровы, относились к четырем или шести семействам. Но все они — наземные бегающие, весили 30–80 кг и не были способны летать. Сторонники происхождения птиц от продвинутых хищных динозавров доказывали, что именно от таких форм и произошли настоящие летающие птицы, пройдя путь через все более и более быстрый бег по земле. Находка же четырехкрылого планёра дает существенные аргументы в поддержку древесной гипотезы происхождения полета.

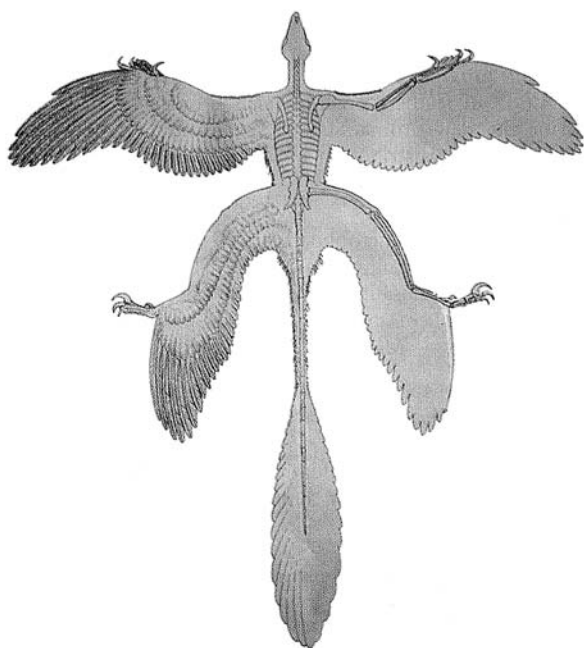
Четырехкрылый микро-раптор внес большую сумятицу в умы ученых, занимающихся происхождением птиц. Некоторые, ранее считавшие птиц производными от дромеозаврид или овирапторид, полагают, что эти динозавры произошли от птиц, спустившихся с деревьев на землю и утративших способность к полету. Сторонники более древнего происхождения птиц от каких-то ранних архозавров считают овирапторид и дромеозаврид не динозаврами, а птицами, утратившими способность летать. При этом многие продолжают видеть в археоптериксе предка всех птиц. Именно в такой постановке, как мне представляется, кроется противоречивость и несогласованность обеих гипотез. Некоторые научные авторитеты давно старались доказать, что археоптерикс — это оперенная рептилия, которая не может быть предком настоящих птиц, а скорее всего представляет собой отдельную тупиковую линию в эволюции хищных динозавров. Но для

¹ Горные ледники в тропиках отступают // Природа. 2002. №2. С.85.

² Xu Xing et al. // Nature. 2003. V.421. №6921. P.335–340.

³ Rowe T. et al. // Nature. 2001. V.410. №6828. P.540.

⁴ Prum R.O. // Nature. 2003. V.421. №6921. P.323–324.



Микрооратор гуи — летающий оперенный динозавр; справа — его реконструкция.

многих специалистов неоднократно происхождение оперения казалось невозможным. Теперь, после появления различных китайских целурозавров с различным оперением, параллельное его возникновение уже не представляется невероятным.

Китайские целурозавры в пуху и перьях не единственная сенсация из нижнемеловых отложений провинции Ляонин. Там открыты разнообразные энанциорнисы, древнейшие веерохвостые птицы, ряд млекопитающих, черепахи,

различные рыбы, первые цветковые растения и др. В целом этот комплекс имеет юрский облик¹. По абсолютным изотопным датировкам отложения признаны раннемеловыми (130–120 млн лет). Поэтому весь данный комплекс животных можно было бы назвать юрским зоопарком в меловом периоде.

© **Е.Н.Курочкин**,
доктор биологических наук
Москва

¹ Zhou Zhonghe et al. // Nature. 2003. V.421. №6925. P.807–814.

Археология

Археологические находки в Армении

Издавна эта скала, расположенная вблизи пос.Агарак в Армении, выглядит, как завихренная морская волна, готовая обрушиться в низину, но по мере приближения к ней становятся различимы на 15-метровом выступе очертания бараньей головы с лихо закрученными рогами. Размер этого глубоко высеченного в камне изо-

бражения около одного метра. Если пройти по самому краю обрыва, перед глазами предстанет еще один затронутый временем барельеф — нечто похожее на голову быка с рогами и широко разверстыми ноздрями, а далее — огромная, правда, с трудом угадываемая голова страшного дракона.

Исследовать этот загадочный «музей» сотрудники Института археологии и этнографии Армянской АН начали всего несколько лет назад, но вскоре убедились, что Агарак хранит богатейшую информацию о прошлом народов Кавказа — от раннего бронзового века (около 5 тыс. лет назад) до позднего средневековья. А ведь пока исследована лишь относительно небольшая часть местности.

Всего несколько лет назад все это могло бесследно исчезнуть: предполагалось расширить расположенную рядом каменоломню, где добывался туф — популярнейший стройматериал в Закавказье. Но ученым повезло: археолог Б.Гаспарян показал сотруднику посольства США в Ереване М.Гфеллеру (M.Gfoeler), который оказался любителем древностей, многочисленными памятниками тысячелетней культуры своей страны, и тот понял, что здесь — непочатый край для исследований, а брат Гфеллера, довольно богатый человек, создал специальный фонд помощи археологам Армении.

Первые же раскопки принесли ученым керамические сосуды бронзового века, но в тех краях удивить этим невозможно. Вскоре число работающих на перспективном поле достигло 1000 человек, и вся эта «армия» во главе с опытным археологом П.Аветисяном вскрыла к началу 2002 г. около 5 тыс. м² площади (лишь небольшую часть запланированных 200 га) и тщательно ее обследовала. Участие в раскопках приняли

и американские специалисты — археолог А.Т.Смит (A.T.Smith) и антрополог Ф.Коль (F.Kohl), эксперт по Закавказью.

Уже открыты свидетельства широкомасштабной деятельности древнего человека: каменные ступени огромной лестницы, ведущей к многочисленным нишам, которые выдолблены в стенах ущелья; подковообразные полупещеры, связанные между собой туннелями, которые пробиты в туфовом монолите; отделенные от скалы трапезиевидные блоки камня... Ясно, что Агарак с его алтарными помещениями служил некогда важным религиозным центром.

Рабочие приступили к вскрытию остатков каменных жилищ, образующих целую улицу. Здесь нашлось немало терракотовых статуэток и керамических изделий, характер которых позволяет связать это поселение с куро-аракской неолитической культурой эпохи ранней бронзы, распространенной в Закавказье в XXIX—XXVII вв. до н.э. Видимо, необычная скала стала тогда чем-то вроде храма под открытым небом и местом поселения жрецов.

Уже то, что обнаружено и изучено хотя бы поверхностно, вызывает бездну дискуссий среди специалистов. Так, эксперт по доисторическому Среднему Востоку П.Ломбард (P.Lombard) вообще не уверен, что каменные барельефы, изображающие животных, — продукт рук человеческих, а не естественной эрозии. Но с таким скептическим взглядом не согласно большинство его коллег — одно лишь выветривание к подобным результатам привести не могло.

Тайна заключена и в тысячах небольших округлых ямок размером от крупной монетки до чайного блюдца, разбросанных по всей обнаженной поверхности

скалы. Гаспарян предполагает, что эти углубления — следы от некогда установленных столбов. Они расположены слишком регулярно, чтобы быть результатом эрозии, утверждает и Смит, хорошо разбирающийся в подобных вопросах.

Агарак богат следами и более поздних, чем бронза, эпох: уже найдено несколько отлично изготовленных урартских глиняных амфор (они явно относятся к VIII—VI вв. до н.э.); монеты с профилями Александра Македонского и Октавиана Августа (27 г. до н.э. — 14 г. н.э.). Вскрыты саркофаги, в которых находились останки тел, захороненных как в языческие, так и в раннехристианские времена, в период между IV в. до н.э. и IV в. н.э.

Очень интересными для специалистов оказались образцы глиняной кухонной утвари XII—XIV вв., керамика и монеты эпохи Ереванского ханства, существовавшего в XVII—XVIII вв. Коль отмечает, что один лишь факт непрерывного тысячелетнего обитания людей, весьма редко встречаемый где-либо на Кавказе, уже делает Агарак уникальным.

Правительство Армении постановило признать значительную часть этой территории Национальным парком. А Фонд Гфеллера выделил еще 60 тыс. долл. на ближайшие несколько лет; кроме того, им субсидируются пробные и начальные раскопки еще и в других районах Армении. Появились сообщения, что обнаружена неизвестная пещера, стены которой покрыты рисунками, возможно, восходящими к каменному веку. На севере страны вскрыты останки ранних гоминид, и если это подтвердится, они станут прекрасным дополнением к знаменитым уже аналогичным находкам у пос.Дманиси в Грузии.

Science. 2002. V.298. №5602. P.2319 (США).

О компьютерах, мышлении и законах физики

В.Г.Сурдин,

кандидат физико-математических наук

Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга
Москва

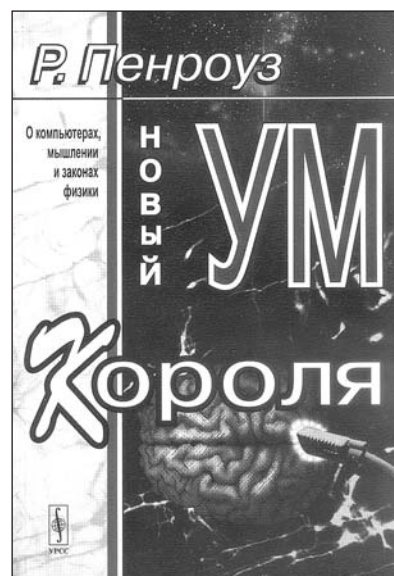
Эту книгу мы ждали, о ней говорили, на нее ссылались западные авторы, уже давно имевшие возможность прочитать ее в оригинале. Мощный нестандартный талант английского математика и физика Роджера Пенроуза обещал нам незаурядное произведение. Так оно и оказалось.

Тема книги — загадка человеческого мышления. Как пример незаурядности этого явления автор без ложной скромности демонстрирует собственный интеллект, причем весьма убедительно. Читателей, знакомых с творчеством Пенроуза, казалось, уже мало что может поразить. Сэр Роджер уже более 40 лет активно работает в различных областях физики, он избрал новые математические объекты — твисторы (причем как раз в эпоху популярности «твиста»), он — автор знаменитой «машины Пенроуза», вычерпывающей энергию из черных дыр. Именно он, работая вместе со Стивеном Хокингом, доказал известную теорему Пенроуза о неизбежности рождения физической сингулярности пространства—времени в ходе релятивистского коллапса космических тел. Одним словом, автор книги не из праздного любопытства заинтересовался чело-

веческим мышлением; просто он пытается понять принцип работы того восхитительного механизма, пользоваться которым научился в совершенстве.

Как повод для раздумий Пенроуз использует работы над искусственным интеллектом (ИИ), так или иначе сводящиеся сегодня к искусству программирования. «Можно ли представить себе мышление как запрограммированный процесс? Существует ли алгоритм мышления?» — спрашивает Пенроуз. Возможно, читатель так и не догадался бы о том, какой ответ приготовил ему автор, но тайну выдал Мартин Гарднер, написавший в своем предисловии к этой книге: «...я вижу Пенроуза — мальчика, сидящего в третьем ряду, позади признанных корифеев в области ИИ, — который не боится высказать им вслух свое мнение, что их КОРОЛИ-ТО ГОЛЫЕ». Именно так понял Гарднер название книги Пенроуза, которое явно перекликается с названием известной сказки Г.-Х.Андерсена «Новое платье короля».

Имена Хокинга и Пенроуза часто соседствуют: вместе они изучали Вселенную, гравитацию; писали работы о природе сингулярности и публично дискутировали о «стреле времени» [1]. И почти одновременно, в конце 80-х, они взялись за написание научно-популярных



Р.Пенроуз. Новый ум короля. Пер. с англ.: А.Дамбис, Ю.Данилов, С.Кокарев, В.Малышенко, И.Ольшевский, Л.Яковенко.

М.: Едиториал УРСС, 2003, 382 с.

книг, избрав при этом разный подход. Хокинг в своей книге, впервые увидевшей свет в 1988 г., честно признается: «Мне сказали, что каждая включенная в книгу формула вдвое уменьшит число покупателей. Тогда я решил вообще обходиться без формул» [2]. Но мог ли Пенроуз пойти тем же путем? Готовя свою книгу на год позже, он в специальном «Обращении к читателю» явно намекает на чрезмерную уступчивость Хокинга: «Меня не утратило, — пишет Пенроуз — известное предостережение, что каждая формула в книге сокращает вдвое круг читателей». Далее он лукаво советует не обращать внимание на формулы, если читатель испытывает перед ними ужас. Автор знает, что отнюдь не формулы потребуют наибольшего напряжения ума.

До появления этой книги Пенроуз не был широко известен как популяризатор науки. Взявшись за новое для себя дело, он подошел к нему в высшей степени оригинально, продемонстрировав читателю, что красота науки заключена не в словах, а в результатах: одна из страниц книги, 72-я, целиком заполнена «нулями» и «единицами», в совокупности представляющими универсальную машину Тьюринга. Пожелал ли автор бросить дерзкий вызов читателю, или он искренне хотел порадовать пытливые умы еще одной «игрой в бисер»?

Думаю, для Пенроуза именно эта игра и есть наивысшая реальность бытия. В нескольких главах автор демонстрирует изумительные математические объекты — комплексные числа, фракталы, множество Мандельброта; он обсуждает теорему Ферма и проблему вычислимости, возникающую в связи с существованием четко определенных и все же неразрешимых математических операций. А затем, очаровав читателя математикой, Пенроуз спрашивает: «Что такое математика — изобретение или открытие? Процесс

получения математиками результатов — что это: всего лишь построение не существующих в действительности сложных мысленных конструкций, мощь и элегантность которых способна обмануть даже их собственных изобретателей, заставив их поверить в реальность этих не более чем умозрительных построений? Или же математики действительно открывают истины уже где-то существующие, чья реальность в значительной степени не зависима от их деятельности? Я думаю, что читателю должно стать уже совершенно ясно, что я склонен придерживаться скорее второй, чем первой, точки зрения, по крайней мере в отношении таких структур, как комплексные числа или множество Мандельброта».

Говоря о принципах мышления, Пенроуз детально рассматривает тезис о том, что «мысленные есть божественный алгоритм» (с ударением на «алгоритм»). «Что есть истина? — спрашивает Пенроуз. — Как мы составляем наши суждения о том, что в мире является справедливым, верным, а что — нет? Следуем ли мы некоторому алгоритму, которому отдается предпочтение среди прочих, менее эффективных, в процессе всемогущего естественного отбора? Или же возможен некий иной путь — не алгоритмизированный, а основанный на особой пронципальности, интуитивный, инстинктивный — позволяющий угадывать правду?»

Ясно, что в дискуссии о мышлении невозможно обойти вопрос о свободе воли разумного существа. В рамках ньютоновой физики, с ее детерминизмом, он особенно тяжел. «Я действительно считаю, — пишет Пенроуз, — что вопрос о свободе воли представляет собой реальную, а не вымышленную проблему — но она в высшей степени нетривиальна и ее трудно сформулировать адекватно. Вопрос о детерминизме в физической теории, безусловно, важен, однако

я убежден, что он не является камнем преткновения. Например, мир может быть детерминистским, но невычислимым. Иначе говоря, будущее может определяться прошлым, но точно рассчитать его при этом будет в принципе невозможно». Вот такой математический изыск; не правда ли, неожиданный?

Встав на этот путь, Пенроуз не ограничивается формулировкой проблемы: «Я попытаюсь изложить аргументы, показывающие, что действие нашего наделенного сознанием разума неалгоритмично (т. е. невычислимо). Соответственно, свобода воли, которой мы наделены (по нашему глубокому убеждению), должна быть тесно связана с какой-то невычислимой составляющей законов, управляющих тем миром, в котором мы живем. Независимо от того, принимаем ли мы или отвергаем такую точку зрения на свободу воли, интерес для нас представляет вопрос именно о вычислимости данной физической теории (например, ньютоновской динамики), а не о том, является ли она детерминистской. Вопрос о вычислимости отличен от вопроса о детерминизме. Утверждение о том, что это — два совершенно разных вопроса, как раз и служит одним из основных тезисов в данной книге».

Проведя читателя по лабиринтам гамильтоновой и квантовой механики, обеих теорий относительности и несуществующей пока квантовой теории гравитации, обсудив строение мозга и механизм зрения, антропный принцип и космологическую «стрелу времени», невербальные мысли и математическое озарение (сам Пенроуз увидел как-то в полудреме невозможный объект в четырехмерном пространстве!), автор наконец заявляет: «Я утверждаю, что явление сознания не может быть описано в рамках современной физической теории».

Здесь не место (да и не хочется) спорить с Пенроузом,

но так ли уж безнадежна идея о мозге как очень сложном, но вполне детерминированно работающем компьютере? Скажем, настольный вентилятор не отличается в принципе от вертолета. Но чисто количественное различие между ними в механической мощности обеспечивает одному из них новое качество — возможность полета. Поэтому не исключено, что правы именно те, кто считает наш мозг всего лишь очень сложным логическим автоматом. Но интуиция подсказывает Пенроузу, что человеческий мозг представляет собой устройство более сложное, чем просто «набор проводков и переключателей». Быть может, именно интуиция — лучшее тому доказатель-

ство. Именно она провела Человека от кремниевого ножа до транзистора. И хотя электронный компьютер — воплощенная логика — уже превзошел «биокомпьютеры» А.Карпова и Г.Каспарова, но до вершин интуиции Ферма и Пенроуза ему еще далеко. Но мне почему-то кажется, что и до этих вершин он когда-нибудь доберется.

Вот и математик Давид Рюэль хорошо отзываясь о книге Пенроуза, хотя и не полностью разделяет его взгляды: «Это блестящее изложение современных научных идей. В то же время это изысканное обращение, в котором автор предлагает изменить законы физики, чтобы приспособить их к сознанию, и интроспективная точка зрения на то,

что наш разум действует не как компьютер. Ясно, что законы физики нужно изменить, чтобы приспособить их к квантовой гравитации, но я очень сомневаюсь, что это произойдет согласно идеям Пенроуза. Работая с сознанием и интроспективными определенностями, нельзя забывать, как умен и силен наш разум, когда дело касается самообмана. Это один из тех уроков психоанализа, которые невозможно легко забыть» [3].

Так или иначе, но книга Пенроуза открыла научную дискуссию, от которой сам ее автор уже не может быть в стороне. Поэтому развитие своих взглядов он описал в книге «Тени разума» (1994). С нетерпением ждем и ее перевода. ■

Литература

1. Хокинг С., Пенроуз Р. Природа пространства и времени. Ижевск, 2000.
2. Хокинг С. Краткая история времени. СПб., 2001.
3. Рюэль Д. Случайность и хаос. М.; Ижевск, 2001.

Физика

Д.Н.Зубарев, В.Г.Морозов, Г.Репке. СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ: В 2 т. Пер. с англ. А.Г.Башкирова и И.В.Морозова. М.: Физматлит, 2002. 432 с.

Книга представляет собой современный курс статистической теории неравновесных процессов в классических и квантовых системах многих частиц. В отличие от существующих учебников и монографий на эту тему, изложение теории кинетических, гидродинамических и релаксационных процессов основано на едином методе, который обобщает метод статистических ансамблей Гиббса на неравновесные системы.

В первом томе излагаются основы метода неравновесных статистических ансамблей, его приложения к различным задачам классической и квантовой кинетики, а также теория линейной релаксации равновесных систем на механические и термические возмущения.

Во втором томе рассказывается о методе неравновесных функций Грина, теории релаксационных и гидродинамических процессов.

Обществоведение

В.Л.Иноземцев. НА РУБЕЖЕ ЭПОХ: Экономические тенденции и их неэкономические следствия. М.: ЗАО Экономика, 2003. 776 с.

Книга представляет собой сборник статей доктора эконо-

мических наук В.Л.Иноземцева, опубликованных с 1998 по 2002 г. в ведущих научных журналах России («Общественные науки и современность», «Вопросы философии», «Политические исследования», «Свободная мысль — XXI век», «Вестник РАН» и др.).

Анализируя тенденции мирового экономического развития, автор приходит к необходимости рассматривать гораздо более широкий спектр проблем, простирающихся от геополитики и международных отношений до особенностей современной государственности и этических аспектов общественного устройства. Представленные материалы, собранные под одной обложкой, показывают сложную и динамичную картину современного мира.

В январе 2002 г. статья В.Л.Иноземцева «Кризис Киотских соглашений и проблема глобального потепления климата» появилась на страницах журнала «Природа». В ней говорится о выходе США из Международного соглашения по ограничению выбросов парниковых газов (Киото, 1997), что заставляет переоценить перспективы движения к экологически безопасному миру.

Автор занимает пост директора Центра исследований постиндустриального общества. Сфера его научных интересов — мировая экономика и международные отношения, социальные проблемы современных западных обществ и стран третьего мира.

Археология

В.В.Волков. ОЛЕННЫЕ КАМНИ МОНГОЛИИ. Отв. ред. М.А.Дэвлет. М.: Научный мир, 2002. 248 с.

Оленные камни — замечательные памятники древнего монументального искусства, символ культуры Центральной Азии. Наибольшее их число сосредоточено в степях Монголии.

Они представляют собой каменные стелы с изображениями различных животных (козлов, кабанов, лошадей и др.). Название «оленные» происходит от часто встречающихся стилизованных фигур летящих оленей, которые олицетворяют человека, героя-воина. Имеются отдельные скульптурно выполненные фигуры, хотя и крайне условно. В верхней части — шапочки, повязки, височные подвески или серьги, ожерелье. В середине — пояс, оружие (кинжал, нож, чекан, лук, боевой топор, оселок). На камнях изображены заштрихованные пятиугольники, отождествляемые со щитами воинов из кожи или дерева.

Виталий Васильевич Волков (1933—2000) — доктор исторических наук, заведующий отделом бронзового века в Институте археологии РАН, известный исследователь древностей Центральной Азии.

Первое издание этой книги, посвященной высокохудожественным памятникам первобытного искусства, вышло в 1981 г. небольшим тиражом и сразу же стало библиографической редкостью. Напечатанная в Монголии книга фактически была полиграфическим браком: расплывчатые иллюстрации на серой газетной бумаге с крупнозернистым грязным фоном.

Второе издание подготовлено по материалам последних публикаций автора. Оленные камни Монголии — важнейший исторический источник скифо-сибирского звериного стиля.

История науки

Р.Л.Берг. СУХОВЕЙ: Воспоминания генетика. 2-е изд., доп. М.: Памятники исторической мысли, 2003. 527 с.

Суховой — иссушающий ветер, губитель всего живого, символ зла. Идея дать книге такое название родилась в США, в телефонном разговоре двух эмигрантов. Беседовали старые друзья, диссиденты, ленинградцы: биолог, автор книги, и филолог, литературовед, поэт-переводчик Геннадий Шмаков. Книга была написана в конце 70-х по предложению главного редактора издательства Корнельского университета (США), который впоследствии отказался выпустить ее в свет.

Известный генетик, историк науки и защитник прав человека, Раиса Львовна Берг (дочь академика Л.С.Берга — географа, ихтиолога и эволюциониста) родилась в Санкт-Петербурге в 1913 г. Ее друзьями были А.Д.Сахаров, В.И.Вернадский,

А.Гинзбург. Уехав из страны в 1974 г., она в течение 20 лет работала в США, ныне проживает во Франции.

В книге, ранее изданной в США (1983) на русском и английском языках, рассказывается о судьбе русской интеллигенции.

История науки

АТОМНЫЙ ПРОЕКТ СССР: Документы и материалы: В 3 т. Под общ. ред. Л.Д.Рябева. Т.1. 1938—1945: В 2 ч. Ч.2. Отв. сост. Л.И.Кудинова. М.: МФТИ, 2002. 800 с.

Сборник подготовлен Государственным российским центром «Физико-энергетический институт им. Академика А.И.Лейпунского» совместно с архивом РАН и Министерством РФ по атомной энергии. Первая часть была издана в 1998 г.

Вторая часть отражает работы по проблеме создания советского атомного оружия в 1944—1945 гг. Это физические исследования, связанные с конструкцией бомбы и разработкой реакторов; изучение различных методов разделения изотопов урана и возможности их промышленного производства; организация геологоразведочных работ по добыче руды; разработка технологии и получение металлического и шестифтористого урана, солей, графита, тяжелой воды.

В сборник включено более 200 документов правительственных организаций, предприятий, разведорганов СССР, ранее не публиковавшихся, а также рукописи научных работ (1943) ведущих советских ученых: И.В.Курчатова, Ю.Б.Харитона, Я.Б.Зельдовича, В.Г.Хлопина, А.Ф.Иоффе, П.Л.Капицы, А.Е.Ферсмана, Д.И.Щербакова, Г.Н.Флерова, А.И.Алиханова, И.К.Кикоина.

«Наполеоново» землетрясение

Б.И.Силкин
Москва

Один из самых «прослеженных» историками людей — Наполеон Бонапарт. Если не считать детства и самой ранней юности, то о его судьбе можно найти чуть ли не почасовые сведения. Биографов еще при жизни этого выдающегося человека было немало, а уж после его смерти десятки почитателей — бонапартистов и врагов — роялистов или республиканцев извели на прославление (чаще) или осуждение (значительно реже) этой личности не одну тонну типографской бумаги.

Литература, посвященная императору Франции, воистину необъятна. Достаточно сказать, что лишь одна библиография, содержащая перечень только книг (но не статей) о нем, составленная швейцарским исследователем Ф.Кирхейзенем (1934), насчитывает девять огромных томов! Примечательно, что во Франции выходил даже специализированный журнал «Обзор исследований о Наполеоне».

«Наполеониада» включает в себя не только отдельные брошюры, сочиненные теми, кто с великим полководцем и государственным деятелем встречался раз-другой, но и многотомные мемуары близких ему

людей, и аналитические трактаты тех, кто, может быть, никогда самого Наполеона и не видел, зато тщательно изучил исторические документы, связанные с ним.

На средства французского правительства были опубликованы 32 (!) тома ин-кварти, где собраны письма, декреты и приказы, лично продиктованные и подписанные Бонапартом. Для одних — «величайший благодетель не только Франции (тысячи сынов которой полегли на полях сражений), но и всей Европы (раскрепощенной от феодализма), а для других — угнетатель народов, узурпатор власти, агрессор, деспот, тиран, душитель свободы, заливший кровью весь континент [1, 2, 3].

Есть, разумеется, и узкие по тематике, вполне добросовестные труды о том, как например, происходила (не без скандалов) коронация императора; книги о его семье с многочисленными жадными до власти и «презренного металла» родственниками; о великой армии, ее победах и поражениях; о монаршем дворе с неизбежными интригами. Отдельно стоят весьма тщательные исследования на тему законотворческой роли Наполеона, — ведь свой Кодекс он ставил выше воинских побед.

Так что, казалось бы, наполеоновский сюжет уже давно исчерпан и больше сказать о том времени нечего. Это так. И не совсем так. Существуют свидетельства связи Бонапарта с наукой, а именно — с сейсмологией, к которой он, вообще-то, имел весьма слабое отношение. Но само событие для науки о Земле отнюдь не столь уж заурядное.

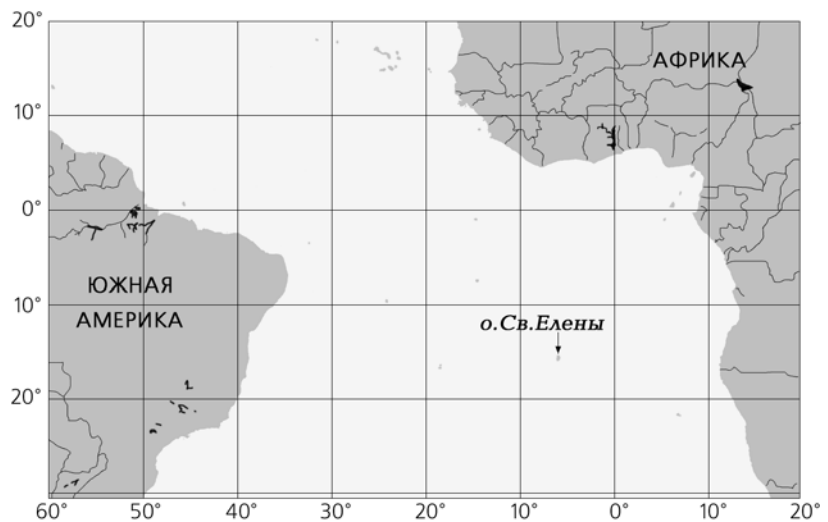
История с географией

Итак, место действия нашей истории с географией, геологией и геофизикой — о.Св.Елена — крошечный, забытый Богом и людьми клочок суши в центре Атлантического океана, недалеко от экватора. Его координаты: 16° ю.ш. и около 6° з.д. Согласно переписи, состоявшейся десятилетие назад, там проживает 5632 человека — главным образом подданные Великобритании, которой он и принадлежит.

Необитаемый островок был открыт через 10 лет после эпического плавания Христофора Колумба. Тогда португальский навигатор Жуан да Нова, возглавлявший эскадру из четырех парусников, направлявшихся в Индию*, на обратном пути слу-

* Индии — здесь имеется в виду недавно открытая Америка.

Карта местонахождения
о.Св.Елена.



чайно наткнулся на него. Так как событие произошло в день Святой Елены, благочестивый католик над наименованием острова долго не раздумывал.

Особой привлекательностью открытие сперва не отличалось — там не было ни возделанных пряминостей, ни золота, ни индейцев, годных для работы на плантациях или в рудниках. Так что заселять остров европейцы не торопились. (Сегодня единственный городок там — «столица» Джеймстаун, где и обретается большая часть жителей.) Однако в его гавань суда заходили не столь уж редко: здесь всегда можно было пополнить запасы пресной воды и починить такелаж, пострадавший в бурю.

Остров был заселен в 1659 г., когда Оливер Кромвель, лорд-протектор Англии, выдал купцам Ост-Индской компании хартию на владение. Они основали там свою факторию. А в 1673 г. он стал разменной монетой для воевавших между собой англичан и голландцев и перешел в руки Нидерландов. В том же году британцы с пушечной пальбой вернулись и восстановили свой форпост на пути в богатое Карибское море. Позже стратегическое расположение Св.Елены укрепились, но после строительства

Суэцкого канала он вновь был полузабыт.

Все это было далеко от науки, пока Св.Еленой вплотную не занялся верный натуралист капитана Джеймса Кука — Иоганн Форстер. (В 1750—1756 гг. он со своим отцом Георгом совершил познавательное путешествие по России и получил немалый опыт.)

Форстер прибыл сюда на корабле «Resolution», совершавшем в 1772—1775 гг. кругосветное путешествие, и составил первое научное географическое описание острова, перечислив «недоступные» скалы, разделенные глубокими ущельями, и отметив грубые очертания береговой линии, делающие его «непокоримой» крепостью. Внимательный глаз натуралиста отметил вулканическое происхождение этого клочка суши, омываемого Атлантикой [4].

Более углубленно взглянул английский геолог, посетивший Св.Елену в 1834 г. Именно он установил, что остров представляет собой остаток древнейшего и давно погасшего вулкана*. Вершина острова — пик Дайнас возвышается на 823 м над

* Недавно в одной из ведущих московских газет перечислялись некоторые действующие в наше время вулканы, была названа и Св.Елена. На самом деле последние извержения случились там миллионы лет назад.

ур.м. А описанные еще Форстером ущелья оказались узкими долинами, по которым от вершины к морю идут дождевые водостоки, способствовавшие ее мощной эрозии.

Всего шесть суток провел на острове Ч.Дарвин (1839), когда корабль «Beagle» возвращался из «кругосветки» [5]. Но и этого времени хватило разностороннему натуралисту, чтобы подробно и аргументированно подтвердить его вулканическое происхождение. Великий биолог интересовался происхождением изолированных участков суши (это, помимо прочего, способствовало решению вопросов, связанных с происхождением и эволюцией видов), так что не случайно в 1876 г. вышли «Геологические наблюдения вулканических островов», где он касается и Св.Елены [6].

Геология Св.Елены

Конец XIX и начало XX в. породили ветвь геологии и геофизики, именуемую геотектоникой, — дисциплину, занимающуюся изучением строения Земли в ходе развития и движения ее коры и верхней мантии под влиянием различных глубинных и поверхностных процессов. В 1869 г. появилась ра-

бота Дж.Р.Оливера «Геология Св.Елены», тут же в Джеймстауне и напечатанная и долго служившая главным источником информации.

Но еще большее значение приобрели две обширные статьи Р.О.Дейли, опубликованные в 20-х годах прошлого века и посвященные строению и происхождению «родственных» друг другу во многих отношениях островов Св.Елены и Вознесения (последний был открыт тем же Жуаном да Нова в 1501 г.) [7]. Теперь мы знаем, что основание спящего вулкана Св.Елена находится на дне Атлантики, где глубина достигает более 4 тыс. м (и 800 м — над водой). Подводный диаметр горы превышает сотню километров, так что весь занимаемый ею район в 10 раз больше, чем у знаменитой Этны, а объем геологических пород по меньшей мере раз в 20 превышает эту «итальянку».

С 60-х годов минувшего столетия широко применялись методы датирования, основанные на изотопном анализе. На о.Св.Елена этим занялся молодой тогда английский ученый И.Бейкер, защитивший в 1968 г. диссертацию в Лондонском имперском колледже. По соотношениям К и Аг в 24 репрезентативных образцах он составил детальную хронологию вулканической активности, приведшей к рождению острова.

Будучи уже доктором наук Бейкер показал, что природа начала активно «строить» остров примерно 14—11 млн лет назад, а самый молодой вулканический щит был образован излияниями магмы в период между 11 и 8 млн лет назад. С тех времен единственным проявлением вулканической деятельности были довольно слабые фумаролы — струи горячего газа и пара, выделявшиеся из расселин. Развивая идеи Дарвина, Бейкер описал, как и когда могло происходить заселение острова различными видами флоры и фауны после очередного опус-

тошения, вызванного новым катаклизмом [8].

Не так давно группа французских геохимиков и петрологов, возглавляемая С.Кулоном, подвергла изотопному анализу интрузивные магматические породы Св.Елены, содержащие стронций, ниобий и палладий. Это позволило сделать вывод: весь остров расположен на «хвосте» плюма, вздымающегося из глубинных недр к поверхности. «Хвост» образуется потому, что вся здешняя плита земной коры движется с северо-востока на юго-запад, а верхушка плюма оставляет свой след на поверхности в виде характерно горячей точки.

Геолого-геофизическая история этого интереснейшего для специалистов уголка земли рассказывает и о том, насколько данный регион подвержен сейсмической активности. Однако нельзя утверждать, что землетрясения были здесь особенно частыми или слишком разрушительными, но они все же время от времени случались.

В архивах британской геологической службы числилось всего семь подобных событий, произошедших после 1917 г. и затронувших регион, лежащий между 11° и 21° ю.ш. и простирающийся от гринвичского меридиана до 10° з.д. Св.Елена находится как раз в центре этого квадрата. Все толчки (последний относится к маю 1987 г.) были не слишком сильными — их магнитуда не превышала 5.1, а глубина залегания очага (гипоцентр) составляла около 10 км.

Ближайший континент Африка, где подобные явления могли быть зарегистрированными, во-первых, находится далеко, а во-вторых, всегда очень слабо оснащался сейсмической аппаратурой. Не исключено, что некоторые события ускользнули от внимания ученых, а интенсивность других оценена неточно. Бесприборные же данные, говорящие лишь об ощущениях людей, нахо-

дившихся на острове, здесь отсутствуют.

Авторитетом у специалистов пользуется Международный сейсмологический центр, имеющий более полные сведения, чем национальные архивы. Там также значатся два события, происшедшие в 80-х годах XX в., но эпицентрами обоих названы точки, лежащие на 150—200 км ближе к острову, чем в британских источниках. Согласно этим данным, жители Джеймстауна должны были бы почувствовать толчки.

«Это должно быть землетрясение!»

Однако заглянем в более отдаленные исторические времена. Покопавшись в джеймстаунских архивах, научный сотрудник Британского геологического управления Р.М.Массон и его коллега — частный консультант — Д.Н.Холт обнаружили копию доклада, посланного местным представителем Ост-Индской компании своему начальству в Лондон. Датированное 15 июня 1756 г. письмо гласит: «7 дня текущего [месяца] незадолго до 7 часов утра в различных частях острова ощущались два небольших толчка, но ущерба они не причинили» [9].

Другая пожелтевшая от времени бумага, хранившаяся в том же архиве, принадлежала представителю той же компании: «21 мая 1763 г. в 5 часов утра случился мощный толчок. На юге нашего острова фарфоровая посуда попадала с полок, но, слава Богу, повреждения домов не было». Судя по всему, магнитуда события примерно равна пяти.

Вот еще одно «свидетельство», датированное 21 апреля 1770 г.: «получено известие об ужасном землетрясении на о.Св.Елена, который целиком погрузился в море. Но большого доверия это сообщение не вызывает». Действительно, газеты XVIII в. нередко пестрели «стра-

шилками», связанными с отсутствием реальных интересных для читателя событий. О том, что происходит в столь отдаленной местности, тогда можно было узнать лишь спустя долгое время.

Очень скудая информация XVIII в. содержится в «экстрактах из Сент-Хеленских архивов и хроник, составленных покойным Хадсоном Ролфом Янишем, губернатором Св.Елены». Лишь в 1981 г. они были напечатаны в местной типографии: «26 января 1782 г. удар землетрясения ощущался по всему острову и сопровождался рокочущим шумом, что продолжалось приблизительно 4 секунды». Как видим, местные краеведы свое дело знали и два с лишним столетия назад [10].

Перед нами сохранившийся (можно было бы сказать «чудом», если бы речь шла не о британцах) текст частного письма. Леди Эмма Бингем, супруга крупного английского чиновника, находившегося тогда на Св.Елене, сообщает своей сестре Маргеритт в графство Дорсетшир: «Вечером в воскре-

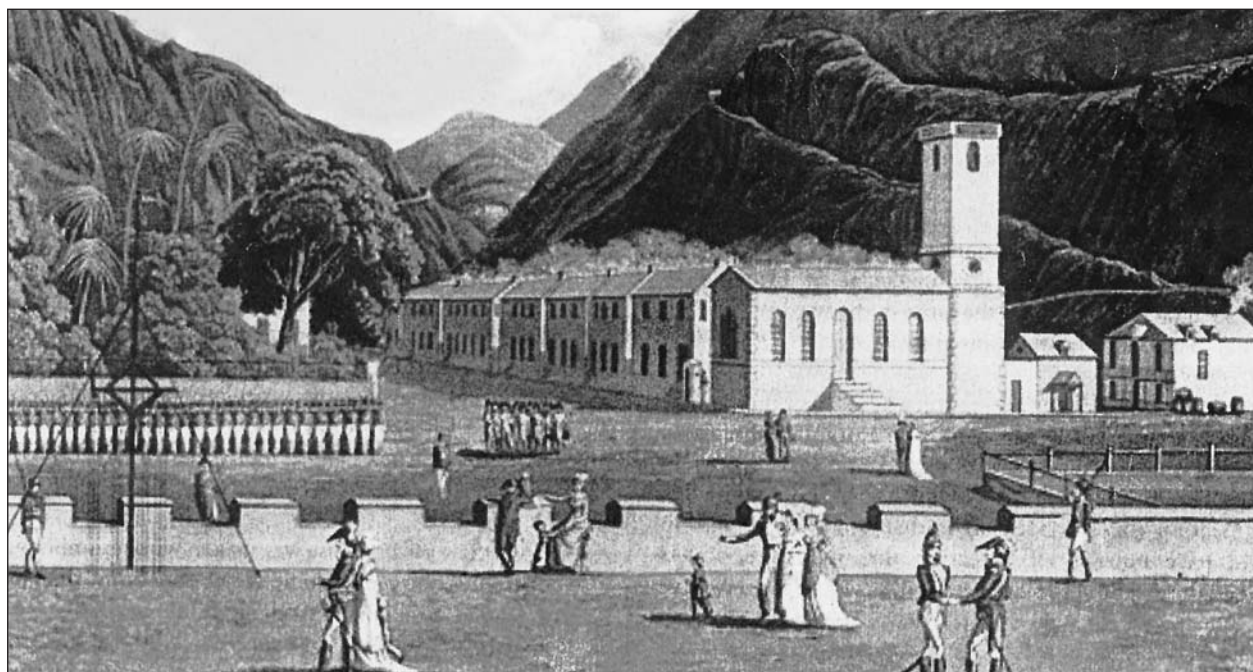
сенье 21 сентября (1817 г. — *Б.С.*), около без четверти десять сэр Джордж (супруг отправительницы письма. — *Б.С.*), майор Харрисон, мистер Тревеннон и я сидели у огня и вели разговор на разные темы, когда неожиданно, как нам показалось сперва, поднялся яростный порыв ветра, потрясший весь дом и сопровождавшийся рокочущим звуком, как будто бы грохочет телега; вся комната и мебель, где мы сидели, затряслись; мы поспешили к передней двери, на яркий лунный свет, а ветра почти не было. Мы воскликнули: «Это должно быть землетрясение!» — и так и оказалось; оно продолжалось секунд 20, и мы еще должны быть благодарны, в нашем крошечном местечке при такой большой опасности. В городе все ощущалось очень сильно, а колокола на церкви еще некоторое время сами звонили» [11].

Город, упоминаемый в письме, это, разумеется, Джеймстаун. (Сами же супруги проживали в небольшом поместье Ноллкомс, что в 6 км к югу.) Как он выглядел, можно легко себе

представить, взглянув на одну из иллюстраций в альбоме художника Дж.Х.Белласиса «Виды Св.Елены», вышедшем в Лондоне за два года до описываемых событий. Перед нами «эспланада» с прогуливающимися леди и джентельменами (главным образом — в офицерской форме), а на втором плане церковь с той самой колокольной, которой еще предстоит во время землетрясения оглашать окрестности своим самовольным громким звоном. Но почему на плацу выстроилось такое количество солдат, непомерное, казалось бы, в мирное время для столь малого населенного пункта?

Вспомним, что как раз тогда островок, о котором никто до того и не слышал, стал известным повсюду. Ведь с 1815 г. здесь находился в заключении французский император, а многочисленное британское войско разместились, чтобы держать его под стражей.

Как же реагировал на сейсмическое событие сам венценосный пленник? Это было дважды зафиксировано на бу-



Вид на Джеймстаун. Изображена церковь, колокола которой звонили во время землетрясения. 1815 г.



Наполеон Бонапарт на о.Св.Елена.
Художник А.Орловский. 1823 г.

маге. Первым документом служит письмо ирландца О'Мира, личного врага Наполеона, адресованное тогдашнему губернатору острова сэру Хадсону Лоу: «Весь дом (т.н. Лонгвуд хаус, в 5 км к юго-западу от Джеймстауна, где и квартировал знаменитый ссыльный. — Б.С.) с ревом закачался, раздался стук, как будто тяжело груженный фургон проехал по верхнему этажу, за чем последовало трясение почвы; на столе зазвенели стаканы, а со стен посыпались картины... Генерал Монтолон (один из приближенных Наполеона, добровольно последовавший за ним в изгнание. — Б.С.) рассказывает, что его сын Тристан, уже легший спать, был разбужен толчком и решил, что его кто-то выталкивает из постели. Генерал Буонопарт (так велено было именовать бывшего императора. — Б.С.) сказал мне, что

при первом толчке он подумал, что это загорелся и взорвался «Conqueror»* или что на острове произошел взрыв порохового склада. Он почувствовал три отдельных толчка и полагает, что их продолжительность составляла примерно от 12 до 14 секунд». Старый вояка, конечно, первым делом подумал о порохе [12].

Но не только официальные лица засвидетельствовали событие и реакцию на него недавнего повелителя чуть не всей Европы. В то время на острове проживала семья некоего Балкома, местного представителя Ост-Индской компании. Его дочери Бетси было 12 лет, и Наполеон, насильственно оторванный от своей семьи, был к этой девочке очень привязан, помогал ей учить французский язык. Позже, в 1844 г., уже будучи леди Элизабет Абелл, она вспоминает следующее.

«В то время мы были в гостях у мадам Бертран <...>. Компания расселась кто на ступеньках около бильярдной, кто в саду <...>. Внезапно мы услышали тяжелое громыхание, как будто рядом под нами проехали груженные фургоны. Те, кто сидел у бильярдной в ужасе повскакали с мест, решив, что дом рушится им на головы. Доктор О'Мира и майор Блекли, который был начальником стражи в Лонгвуде, бросились из комнаты, ожидая увидеть дам в полусмерти от страха. Все, кто был в доме, а некоторые уже легли спать, выскочили в тревоге, некоторые уставились в небо, другие же в изумлении и растерянности не знали, что делать и что могло вызвать подобное потрясение. Маленький Тристан Монтолон, который еще раньше лег спать, с плачем бросился к своей матери, утверждая, что кто-то хотел выкинуть его из кровати. Ужас, который охватил всех нас, могли понять лишь те, кто был давно

* Судно «Conqueror» — британский боевой корабль, дежуривший в гавани также ради «безопасности» Наполеона.

знаком с островом. Особенно обеспокоены были люди, у которых друзья или родственники жили в долинах, узких и клинообразных, окаймленных, как это обычно бывает, огромными обрывами, над которыми нависают колоссальные незакрепленные скалы, угрожающие полным уничтожением всему, что внизу.

Тогда все решили, что толчки были горизонтальными, а не перпендикулярными, и те, которые живут в долинах, погибли под огромными валунами, падавшими с верхушек гор.

Наполеон уже лег спать, и мы увидели его только наутро. Он спросил, был ли кто-либо запуган из-за землетрясения, случившегося вчера вечером, и заметил, что я очень бледна и притихла. Обратившись к генералу Бертрану, он сказал, что сперва принял это за взрыв 74-пушечника «Conqueror», стоявшего в гавани, что на нем взорвался большой пороховой склад. Но когда он почувствовал третий толчок, то понял — это землетрясение. Оно продолжалось 16—18 секунд».

Сегодня специалисты, ознакомившись со всеми информативными для того времени свидетельствами, оценивают магнитуду события как близкую к 5 по европейской макросейсмической шкале. Воспоминания маленькой любимицы Наполеона особенно интересны тем, что в них затронут вопрос камнепада, от которого, действительно, очень часто гибнут люди. Из текста письма видно, что в действительности этого не произошло. Как правильно заметили свидетели, толчок был в основном вертикальным. А это значит, что эпицентр весьма локализован, но в то же время говорит о не слишком большой интенсивности данного явления.

12 августа 1763 г. был еще один, примерно такой же, толчок, но описание его, к сожалению, не сохранилось. Известно только, что он продолжался

с полминуты и при этом никто не пострадал. В 1864 г. произошло еще одно сейсмическое событие. Его очаг, по всей видимости, залегал под дном Атлантического океана, но точное место в то время определить было невозможно. Свидетели лишь сообщают, что двойное сотрясение продолжалось в течение пяти секунд. Это, конечно, явление локальное и сравнительно незначительное; вряд ли оно представляет собой отголосок чего-то отдаленного и более сильного. Сама Св.Елена имеет вулканическое происхождение: здесь мы видим именно сейсмическую активность, а не деятельность окружающего океанского дна. В таких районах мелкие толчки вероятнее, чем мощное землетрясение. В пользу подобных предположений говорят и обстоятельства «Наполеонова» землетрясения.

«Никаких сейсмических событий Наполеон не наблюдал?»

Итак, мы достоверно знаем, что бывший французский император на о.Св. Елена в 1817 г. пережил средней силы землетрясение, которое он первоначально не распознал как таковое. Это вызывает не совсем обычный, но интригующий вопрос: был ли это единственный подобный случай в его и без того беспокойной жизни? Известно, что большая часть карьеры Бонапарта проходила в местах, не отличающихся высокой сейсмичностью. В Париже подземные толчки (как правило, весьма отдаленного происхождения) ощущаются очень редко. То же в Германии, Восточной Европе и европейской части России, где побывал Наполеон.

Другое дело Италия. Первая кампания, которую вел генерал Бонапарт, началась 11 марта 1796 г., когда он, только что отпраздновав свадьбу с Жозефи-

ной Богарнэ, поспешно уехал на театр военных действий. Эта короткая кампания победно завершилась перемирием, подписанным на территории Австрии 18 апреля 1797 г.

Заглянув в Каталог европейских землетрясений (1991), мы обнаруживаем, что за этот период в Северной Италии, где тогда шла война, произошло два сейсмических события: Бухское — 20 апреля 1796 г. ($M=6.2$) и Басса-Паданское (район Венеции) — 22 октября того же года ($M=5$).

Во время первого 28-летний главнокомандующий находился около города Мондови, более чем в 300 км от австро-швейцарской границы, куда пришелся эпицентр. Слишком далеко, чтобы почувствовать подобное, не очень сильное явление.

Второе же событие произошло перед известным сражением у Аркольского моста, прославившим великого полководца еще и как храбреца. Интенсивность толчка была уже не столь мала: магнитуда достигала 6.0. Эпицентр располагался около Виченцы, в пределах района военных операций, проводимых тогда итальянской армией. Как раз в тот день Бонапарт прибыл в Верону, где стояла дивизия: 8500 пехотинцев и кавалерийская бригада в 1600 сабель будущего маршала П.Ф.Ш.Ожеро.

В Вероне ощущался толчок силою в 4—5 баллов. Это произошло в 4 ч утра — Бонапарт все еще был в пути из Феррары и не успел достичь окрестностей Вероны (возблагодарим скрупулезность биографов и историков!). Очевидно, оба события прошли для него незамеченными. Почти весь 1797 г. генерал провел в Милане, но там и в окрестностях никаких сейсмических явлений в тот период не случилось.

Египетская и левантская кампании Бонапарта пришлось на 1798 и 1799 гг. Завоеватель относился к науке довольно уважительно и взял с собой

в Египет нескольких ученых, но ничего интересного в их записках мы не находим. В наше время данную проблему затронул британский исследователь Н.Н.Амбрассейс и его коллеги, которые специализируются на сейсмичности в регионе, где смыкается Африка с Азией. Никаких землетрясений, сообщают они, в те годы не происходило. То же говорят и о периоде Второй итальянской кампании. За время отсутствия Бонапарта в Европе его завоевания были потеряны. В битве при Нови армия А.В.Суворова нанесла французам тяжелое поражение и над Республикой нависла серьезная угроза. К маю 1800 г. Бонапарт, теперь уже первый консул, отправился «на фронт». В те дни, когда в Санкт-Петербурге хоронили Суворова, а Россия, подчиняясь приказу Павла I, уже вышла из состава антифранцузской коалиции, Бонапарта ждали новые победы над Австрией (в том числе крупнейшая — под Маренго). Но для нас тут важно, что во всей Северной Италии, где вершились судьбы Европы, земные недра были спокойны [13].

Словом, если взглянуть на весь наш континент, то с момента рождения Наполеона Бонапарта (1769) до его окончательного отречения от престола и вступления на борт корабля «Bellerophon», направлявшегося к о.Св.Елена, никаких сейсмических событий он, кажется, не наблюдал.

Однако при более тщательном изучении это утверждение может оказаться ошибочным. Несколько лет назад Европейская комиссия заказала специалистам обзор активности земных недр во всем регионе. В 1998 г. был представлен окончательный отчет, хранящийся ныне в банке данных по сейсмической опасности. Там упоминается, что 6 октября 1778 г. на о.Корсика произошло средней силы землетрясение. Великому корсиканцу, вместе с семьей проживавшему тогда в сто-

лице острова, Аяччо, было шесть лет. Единственное дошедшее до нас письменное свидетельство самого события — это воспоминания некоего жителя городка Вико, что неподалеку от Аяччо. На их основании специалисты считают, что

магнитуда толчка составляла около 4.2. Почему-то не обнаружен ни один документ, говорящий о том, что и в Аяччо событие было замечено. В любом случае, оно там не могло не ощущаться, и родители, и сам маленький Наполеон, его бра-

тья и сестры как-то должны были это заметить.

Возможно, именно такой опыт и привел бывшего полководца к пониманию природного происхождения необычного явления, свидетелем которого он стал на Св.Елене. ■

Литература

1. История XIX века / Под ред. Е.В.Тарле. 2-е изд. Т.1, 2. М., 1936.
2. Манфред А.З. Наполеон Бонапарт. М., 1971.
3. Тарле Е.В. Наполеон. М., 1957.
4. Forster J.R. // Haklyt Society. 1982. V.4. P.1—155.
5. Darwin Ch. Journal of Research into Geology. L., 1839.
6. Darwin Ch. Geological Observations of Volcanic Island. L., 1876.
7. Daly R.A. // Proceedings of American Academy of Arts and Sciences. 1927. V.62. P.31.
8. Baker I. The Geology of St.Helena Island. L., 1968.
9. Musson R.M.W., Holt D.N. // Seismological Research Letters. 2001. V.72. №6. P.712.
10. Teale P.L. Extracts from St.Helena Records. Jamestown, 1981.
11. Bingham E. Letter to Her Sister. Dorset, 1817.
12. Van Gils et al. Catalogue of European Earthquakes. Nuclear and technology report. №EUR 13406. 1991.
13. Ambraseys N.N. et al. The Seismicity of Egypt and Arabia. Cambridge, 1994.

ПРИРОДА

Над номером работали

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы
О.О.АСТАХОВА
Л.П.БЕЛЯНОВА
Е.Е.БУШУЕВА
М.Ю.ЗУБРЕВА
Г.В.КОРОТКЕВИЧ
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
Н.В.УСПЕНСКАЯ
О.И.ШУТОВА

Литературный редактор
М.Я.ФИЛЬШТЕЙН

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Младший редактор
Г.С.ДОРОХОВА

Перевод:
П.А.ХОМЯКОВ

Набор:
Е.Е.ЖУКОВА

Корректоры:
В.А.ЕРМОЛАЕВА
Е.А.ПИМЕНОВА

Графика, верстка:
Д.А.БРАГИН

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредители:
Президиум РАН,
Издательско-производственное
и книготорговое
объединение «Наука»
Адрес издателя: 117997,
Москва, Профсоюзная, 90

Адрес редакции: 119991,
Москва, ГСП-1, Мароновский пер., 26
Тел.: 238-24-56, 238-25-77
Факс: (095) 238-26-33
Подписано в печать 11.06.2003
Формат 60×88 1/8
Бумага типографская №1,
офсетная печать, усл. печ. л. 10,32,
усл. кр.-отт. 67,8 тыс., уч.-изд. л. 12,2
Заказ 7411
Набрано и сверстано в редакции

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