

ПРИРОДА

10 13



В НОМЕРЕ:**3 Миронов В.А.****По стопам Гутенберга:
трехмерная биопечать органов**

Решить проблему нехватки органов для трансплантации обещает недавно возникшая и бурно развивающаяся область биомедицинской науки — тканевая инженерия. С помощью технологии трехмерной биопечати можно будет создавать функциональные органы человека в неограниченном количестве. И эти надежды небеспочвенны.

13 Волокитин А.И.**Взаимодействие наносистем
на расстоянии**

Незаряженные, немагнитные тела, как оказывается, могут притягиваться с силой, на порядки превышающей гравитационное взаимодействие. При каких условиях и почему это происходит?

20 Михайлов В.М.**Страна голубых лабиринтов**

«Терек воеет, дик и злобен, меж утесистых громад»... Строки известного русского поэта красочно описывают самое начало очередного цикла в жизни горной реки. Но рано или поздно реки приспособляются к геологической среде, вырабатывая русло одного из двух основных типов: меандрирующее либо ветвящееся. Когда и почему они становятся на тот или иной путь?

31 Семенов В.А.**Глобальное потепление
и аномальная погода
начала XXI века**

Начало прошлого века сопровождалось множеством экстремальных погодных явлений в различных регионах планеты. В их числе летняя жара 2010 г. в Центральной России и ряд аномально холодных зим на севере Евразии. Каков же механизм, связывающий глобальные изменения климата и капризы погоды в региональном масштабе?

42 Беленицкая Г.А.**Жизнь соленосных недр
Мертвого моря и его аналогов**

Уровень рассолов Мертвого моря в течение всей истории его существования испытывал естественные циклические колебания. Их можно считать вполне нормальным и закономерным проявлением жизни недр моря-озера — прошлой и настоящей.

52 Фет В.Я.**Заметки о скорпионах
и скорпиологах**

Скорпионы появились на Земле более 400 млн лет назад, и за долгие годы жизни они почти не изменились. Даже виды, сохранившиеся с каменноугольного периода, мало отличаются от современных. Сегодня описано уже более 200 родов, и зоологи изучают их не один десяток лет. И все же мы до сих пор находим новые виды скорпионов.

Вести из экспедиций**59 Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.****Вулкан Толбачик:
гавайские извержения на Камчатке****68 Кузнецов Г.В.****Новые штрихи к портрету
В.И.Вернадского**

По страницам неопубликованных писем В.И.Вернадского и П.П.Пилипенко

Редакционная почта**77 А.М.Мелихов****Вернуть науке былой авторитет****Встречи с забытым****85 Фандо Р.А.****Из жизни зоологической
лаборатории**

CONTENTS:

3 Mironov V.A. **In the Footsteps of Gutenberg: 3D-Bioprinting of Organs**

Tissue engineering is a recently emerged and rapidly developing field of biomedical research, promising to solve the problem of deficit of organs for transplantation. The 3D-bioprinting technology will make possible unlimited supply of functioning human organs. And these hopes are not unfounded.

13 Volokitin A.I. **Interaction of Nanosystems at a Distance**

Uncharged, non-magnetic bodies, as it turned out, can be attracted to each other with force exceeding gravitational interaction by orders of magnitude. Under what conditions and why this takes place?

20 Mikhailov V.M. **Country of Blue Labyrinths**

«Terek bowling wild and spiteful amongst hanging rocky cliffs...» The lines by the famous Russian poet eloquently describe the very beginning of the recurrent cycle in a mountainous river life. But sooner or later, uplift of the terrain ceases, and rivers adjust to geologic environment shaping themselves into one of two main patterns: meandering or braided. When and why are they taking this or that path?

31 Semenov V.A. **Global Warming and Anomalous Weather of the Beginning of 21 Century**

The beginning of our century was marked by a number of extreme weather events in different regions of the world. These include the summer heat wave of 2010 in Central Russia and a series anomalously cold winters in northern Eurasia. What mechanism can account for the link between climate change and weather caprices at regional scale?

42 Belenitskaya G.A. **Life of Saline Depths of Dead Sea and its Analogs**

The level of Dead Sea brines was subject to cyclic natural oscillations during all its history. These oscillations can be considered as perfectly normal and natural manifestations of the life of its depths — past and present.

52 Fet V.Ya. **Notes about Scorpions and Scorpions Researchers**

Scorpions emerged at the Earth more than 400 mln years ago and almost did not change since then. Even the species known from Carboniferous period (300 mln years ago) have little difference from the modern ones. Now more than 200 genera are described, and zoologists were studying them for many decades. But we still continue to find new species of them.

Notes from Expeditions

59 Belousov A.B., Belousova M.G. **Tolbachik Volcano: Hawaiian Eruptions at Kamchatka**

68 Kuznetsov G.V. **New Touches to the Portrait of V.I.Vernadsky** Through the pages of unpublished letters of V.I.Vernadsky and P.P.Pilipenko

Letters to Editor

77 Melikhov A.M. **To Restore Former Prestige of Science**

Encounters with Forgotten

85 Fando R.A. **From the Life of Zoological Laboratory**

По стопам Гутенберга: трехмерная биопечать органов

В.А.Миронов

Пересадка человеческих органов — одно из крупнейших достижений биомедицинской науки XX в. За шесть десятилетий, минувших со времен первых успешных операций*, хирурги спасли жизнь тысячам больных, а трансплантация органов стала широко распространенным и эффективным методом лечения тяжелых заболеваний почек, сердца, печени и др. Однако успех этого метода омрачен серьезной и до сих пор нерешенной проблемой — недостатком донорских органов для пересадки. Больные годами ждут своей очереди, и некоторые из них умирают, так и не получив подходящего им органа. Более того, неблагоприятная ситуация породила преступный и опасный бизнес — нелегальную про-

* В 1954 г. американский хирург Джозеф Мюррей (J.E.Murray) впервые в мире успешно пересадила почку от одного близнеца другому, в 1959 г. он трансплантировал почку от неродственного донора, а в 1962 г. — от умершего. В 1990 г. Мюррей вместе с Эдвардом Томасом (E.D.Thomas), который первым пересадила костный мозг страдающему лейкемией человеку, удостоен Нобелевской премии «за открытия, касающиеся трансплантации органов и клеток при лечении болезней». Подробнее см: Фролова Е.В., Савченко В.Г., Белянова Л.П. Лауреаты Нобелевской премии 1990 года по медицине — Дж.Мюррей и Э.Томас // Природа. 1991. №1. С.102–104. — *Примеч. ред.*

© Миронов В.А., 2013

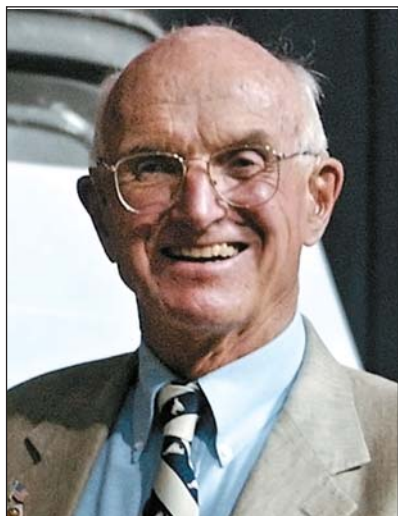


Владимир Александрович Миронов, кандидат медицинских наук, приглашенный профессор отделения трехмерных технологий Центра информационных технологий им.Ренато Арчера (Кампинас, Бразилия) и кафедры химической и биологической инженерии Университета содружества штата Виргиния (Ричмонд, США), ведущий научный сотрудник кафедры биомедицинских систем Московского национального исследовательского университета электронной технологии (Зеленоград) и научный руководитель Лаборатории биотехнологических исследований «3D Bioprinting Solutions» (Москва). Область научных интересов — тканевая инженерия, биофабрикация и трехмерная печать органов.

дажу человеческих органов. Решить проблему нехватки органов для трансплантации обещает недавно возникшая и бурно развивающаяся область биомедицинской науки — тканевая инженерия [1]. С ее помощью можно будет создавать функциональные органы человека в неограниченном количестве. И эти надежды небеспочвенны.

Первые шаги

Многие наслышаны об успешных операциях по пересадке мочевого пузыря, выполненных под руководством Антони Атала (A.Atala), директора Института регенеративной медицины Уэйк-Фореста (США), и по трансплантации трахеи, проведенных Паоло Маккиарини (P.Macchiarelli), профессором регенеративной хирургии в Каролинском институте (Швеция). В обоих случаях органы выращи-



Джозеф Мюррей



Энтони Атала



Паоло Маккиарини

вались на основе бесклеточного (т.е. тщательно очищенного от клеток донора) соединительно-тканного каркаса, или децеллюляризованного экстраклеточного матрикса. Через сохранившиеся кровеносные и проточные каналы его засеивали аутологичными (т.е. не вызывающими иммунное отторжение) клетками, которые предварительно брали у будущего реципиента.

Успех Атала и Маккиарини вдохновил коллег, и вскоре в престижных журналах начали выходить одна за другой статьи, в которых говорится о принципиальной возможности производства пригодных для трансплантации органов, в том числе и таких функционально сложных, как сердце, легкое, печень и почка. Однако для создания этих богатых сосудами (васкуляризированных) органов описанный метод с использованием децеллюляризованного матрикса, к сожалению, пока не годится. Он эффективен, по-видимому, лишь для полых органов с относительно тонкой стенкой. Дело в том, что до сих пор никому не удалось покрыть внутренний просвет сосудов каркаса непрерывным слоем эндотелиальных клеток. А это весьма опасно с клинической точки зрения, так как плохая эндотелизация сосудов напрямую связана с неприемлемо высоким риском возникновения тромбозов и эмболии. Насколько преодолимо (и преодолимо ли вообще?) это технологическое препятствие, покажет только время.

Сейчас некоторые ученые предлагают обрабатывать бесклеточные органые каркасы гепарином или проводить после операции профилактическую тромболитическую терапию. Но даже если это принесет определенный клинический успех, понятно, что такой подход, по всей видимости, будет не самым оптимальным решением проблемы нехватки органов.

Очевидно, что биоинженерия человеческих органов требует новых технологических разрабо-

ток. Одна из них — трехмерная биопечать органов (3D-bioprinting) — роботизированное послойное формирование трехмерных объектов по их компьютерным образам. В разработке этого метода современные «биопечатники» в какой-то степени идут по стопам великого Иоганна Гутенберга, создавшего европейский способ книгопечатания. Чтобы напечатать книгу, как известно, надо иметь текст, бумагу, чернила или краску, печатающий пресс или печатный станок и, наконец, литературу. Для биопечати органов необходимы трехмерная компьютерная модель органа, биобумага — специальный гидрогель, биочернила — способные сливаться между собой тканевые сфериды, картридж для них и биопринтер — диспенсер, т.е. роботическое раздаточное устройство.

Три источника и три составных части

В современном мире все новые технологии создаются, как правило, на основе уже существующих, которые творчески (или креативно, как модно ныне говорить) комбинируют и приспособляют для решения новых практических задач. Метод трехмерной биопечати органов — не исключение из этого общего правила. Он вобрал в себя достижения информационных и технических наук, науки о биоматериалах, а также биологии развития и клеточной биологии, которые стали, перефразируя известное название книги, «источниками» и «составными частями» технологии 3D-bioprinting.

Термин «organ printing» предложила британская журналистка, комментируя пионерные работы Линды Гриффит (L.Griffith) и Майкла Сима (M.Cima) из Массачусеттского технологического института в США. Американские ученые впервые использовали технологию быстрого прототипи-

рования для изготовления из синтетических полимеров пористых скаффолдов*.

Изначально технология быстрого прототипирования применялась для изготовления трехмерных компьютерных моделей (прототипов) различных деталей в автомобильной, авиационной, аэрокосмической и других отраслях промышленности. По сути, происходит создание физического объекта в строгом соответствии с математической моделью, построенной с помощью специальных компьютерных программ CAD (от англ. computer-aided design — автоматизированное проектирование). Теперь эта технология, которую сейчас принято называть аддитивным производством или технологией послойного синтеза, также стала главной составной частью трехмерной биопечати органов. Быстрое прототипирование призвано превратить виртуальную модель, созданную с использованием трехмерного клинического изображения органа, в реальный искусственный орган.

Вторая неотъемлемая часть биопечати органов — разнообразные биоматериалы, которые позволяют создавать желаемую геометрическую форму — каркас органа, удерживающий живые клетки в заданном положении в трехмерном пространстве. Без таких биологически совместимых и со временем разлагающихся биоматериалов (особенно гидрогелей, чувствительных к стимулам) невозможно дальнейшее совершенствование этой технологии. Например, успешное развитие лазерных методов биопечати немыслимо без новых фоточувствительных биоматериалов.

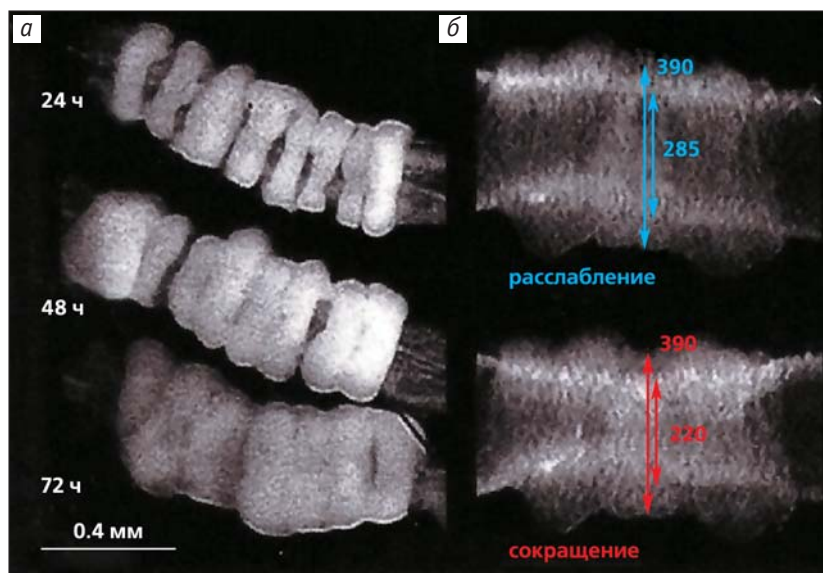
Третья важная составляющая технологии 3D-bioprinting и ее отличительная особенность от других методов быстрого прототипирования — использование непосредственно в процессе биопечати живых клеток или сконструированных из них тканевых сфероидов (микротканей). Их образование, слияние и ускоренное созревание напечатанного органа — это фундаментальные проблемы таких наук, как биология развития и клеточная биология. Более того, практическая реализация технологии биопечати тесно связана с разработкой методов изоляции, селекции, деления (пролиферации), направленной клеточной и тканевой дифференцировки стволовых клеток человека, отвечающих клиническим и этическим

* Скаффолд (от англ. scaffold — леса, подмости) — временный (растворяющийся со временем) полимерный каркас, служащий основой для нанесения дифференцированных или стволовых клеток. — *Примеч. ред.*

требованиям. Но это отдельная и очень обширная тема, которая требует специального рассмотрения и выходит далеко за рамки статьи.

Поскольку в том варианте технологии 3D-bioprinting, который разрабатываем мы, в качестве строительных блоков используются тканевые сфероиды, чуть подробнее расскажу о том, как возникла эта идея. История началась на кафедре анатомии и клеточной биологии Медицинского университета штата Южной Каролины в Чарлстоне, где я в то время работал. Профессор кафедры Роберт Томпсон (R.P.Thompson), изучавший пролиферацию эмбриональных клеток сердца цыпленка, провел эксперимент: разрезал сердце на колечки, вывернул наизнанку и насадил близко друг к другу на полиэтиленовую трубку. Спустя несколько дней они полностью срослись и начали синхронно сокращаться, как прежде единое сердце. Увиденное меня не только удивило, но и навело на мысль — а что если расположить кусочки эмбриональной микроткани (а лучше стандартизированные тканевые сфероиды) так, чтобы они тесно соприкасались друг с другом и в горизонтальном, и в вертикальном положении. Удерживать их таким образом можно, например, заключив в последовательные слои гидрогеля, которые со временем должны деградировать. Если тканевые сфероиды сольются, то их можно будет использовать для изготовления живых трехмерных структур любой формы, т.е. для биопечати.

В 2003 г. мы опубликовали статью, в которой впервые сформулировали концепцию технологии 3D-bioprinting, описали ее биологические основы и технологическую осуществимость [3]. Спустя десятилетие эта статья, по данным поисковой системы «Web of Science», по-прежнему активно цитиру-



Микрофотографии изолированных колечек эмбрионального сердца цыпленка, нанизанных на полиэтиленовую трубку. Видно, как они постепенно срастаются (а) и впоследствии начинают сокращаются (б).

ется. Упомянуты наши пионерные работы и в обзоре, автор которого профессор Брайан Дерби из Университета Манчестера пишет, что технология биопечати «открывает новые области для исследований в тканевой инженерии и регенеративной медицине» [4].

Печать в три этапа

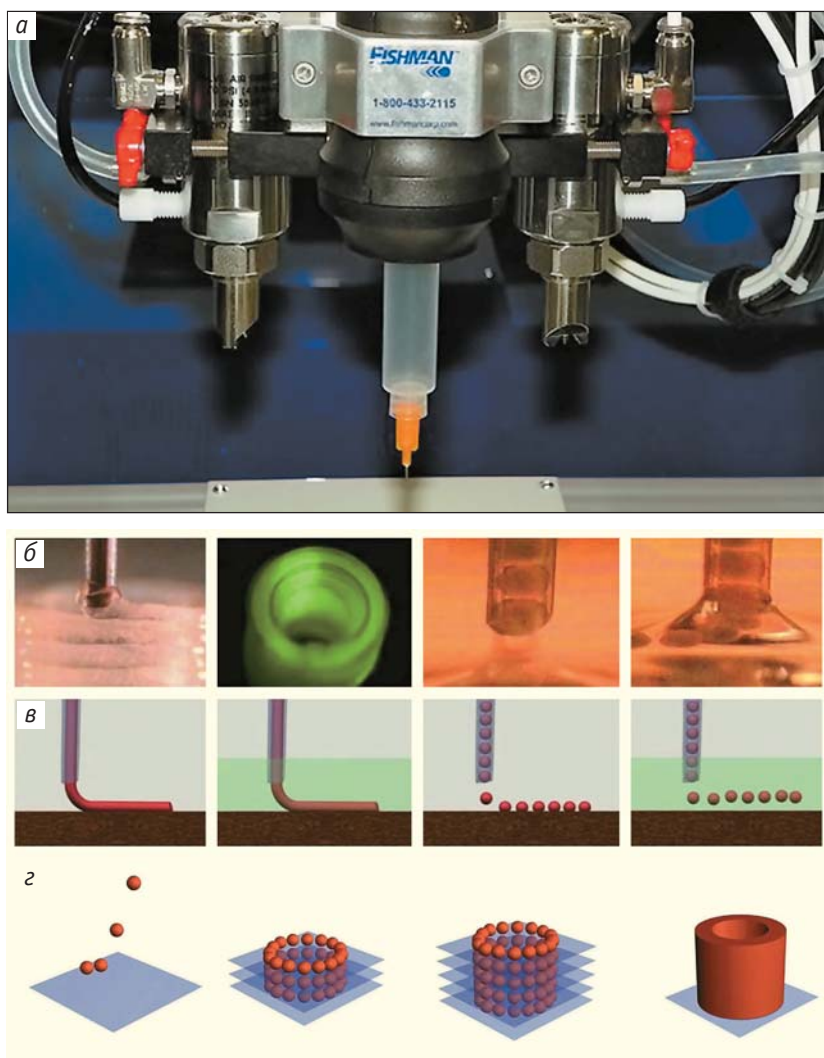
На первой стадии биопечати (на этапе предварительной обработки, или pre-processing) необходимо создать трехмерную виртуальную модель органа на основании его клинического изображения, переведенного в CAD-формат. Затем эту модель надо виртуально разрезать на серийные срезы

и трансформировать в специальный послойный формат — STL-file, легко распознаваемый и читаемый биопринтером. По сути, так создается детальная инструкция для биопринтера — что и в какой последовательности размещать в трехмерном пространстве. Создание компьютерной модели органа, читаемой роботом-биопринтером, — задача нетривиальная. Дело в том, что собранные из тканевых сфероидов конструкции имеют тенденцию к сокращению (ретракции), приводящему к значительному уменьшению ее объема, поэтому при разработке компьютерной модели органа необходимо учитывать коэффициент ретракции, который определяется экспериментально.

Второй этап — собственно печатание (processing), точнее, диспенсирование клеток и тканевых сфероидов с помощью

роботического биопринтера, управляемого компьютером. «Биоумогой» служат разнообразные биосовместимые натуральные или синтетические гидрогели. Их можно либо диспенсировать вместе с клетками, либо распылять так, чтобы образовались последовательные слои гидрогеля, в которые встраивают тканевые сфероиды согласно заложенной компьютерной программе. Однако после окончания этого процесса напечатанная органная биоконструкция еще не готова к пересадке, она должна пройти дополнительную обработку (post-processing).

На этом этапе должны полностью слиться сфероиды и сформироваться зрелые функциональные ткани будущего органа. Напечатанные внутри конструкции кровеносные сосуды должны срастись, стать функционально полноценными и достаточно прочными, чтобы выдерживать ток (перфузию) крови или замещающих ее растворов и последующее хирургическое пришивание к сосудам реципиента. На все это требуется немало времени, однако чем дольше напечатанная конструкция будет находиться в биореакторе, тем дороже станет конечный продукт. Чтобы ускорить созревание тканей, можно использовать так называемые матурогены (от англ. maturation — созревание). Для поиска и оценки возможных кандидатов в матурогены мы разработали специальные мето-



Принципы биопечати [3, 6]. Экспериментальный 3D-биопринтер (а), его головка с кольцевым расположением сопел, из которых выделяются сфероиды, наполненные десятками тысяч клеток (б), при струйной и цифровой печати (в). Внизу представлена схема биопечати из тканевых сфероидов, которые впрыскиваются в последовательные слои гидрогеля и затем сливаются в единую тканевую трубку, при этом гидрогель растворяется (г).

ды тестирования *in vitro* [5]. С их помощью можно будет со временем создать коктейль из тщательно отобранных и протестированных факторов, который обеспечит максимально быстрое созревание свеженапечатанной биоконструкции и ее превращение в функционально полноценный человеческий орган, готовый для пересадки.

Кроме того, необходимо контролировать уровень функционального созревания органа, не повреждая его при этом. Следить за созревающим органом можно, непрерывно анализируя химический и биохимический состав циркулирующей жидкости, используемой в биореакторе, куда помещается напечатанная биоконструкция. А также можно использовать современные методы микроскопии, позволяющие послойно сканировать объект и получать трехмерные изображения высокого качества. Наконец, напечатанные органы должны помещаться в специально сконструированные биореакторы, обеспечивающие плавный переход по мере созревания тканей от межклеточного кровоснабжения (интерстициальной перфузии) к внутрисосудистому [6].

Естественно, сначала первый человеческий орган будет напечатан лишь виртуально, или *in silico*, т.е. с использованием современных методов математического и компьютерного моделирования. С моими бразильскими коллегами из отдела трехмерных технологий Центра информационных технологий им.Ренато Арчера мы уже начали разрабатывать компьютерные модели человеческих органов для биопечати. К тому же уже появились коммерческие биопринтеры, новые биоматериалы и методы масштабной автоматизированной биофабрикации тканевых сфероидов, т.е. технологическое обеспечение второго этапа биопечати. Это внушает вполне обоснованный оптимизм, однако, чтобы довести технологию до безопасного и успешного использования в клинике, необходимо решить еще немало биологических и технических задач, для чего потребуются максимальные совместные усилия ученых разных специальностей и инженеров. На наш взгляд, основные трудности нас ждут на последнем этапе — этапе ускоренного созревания напечатанных биоконструкций.

Ключевые проблемы

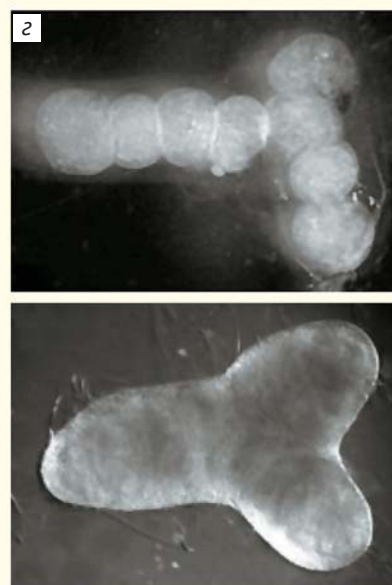
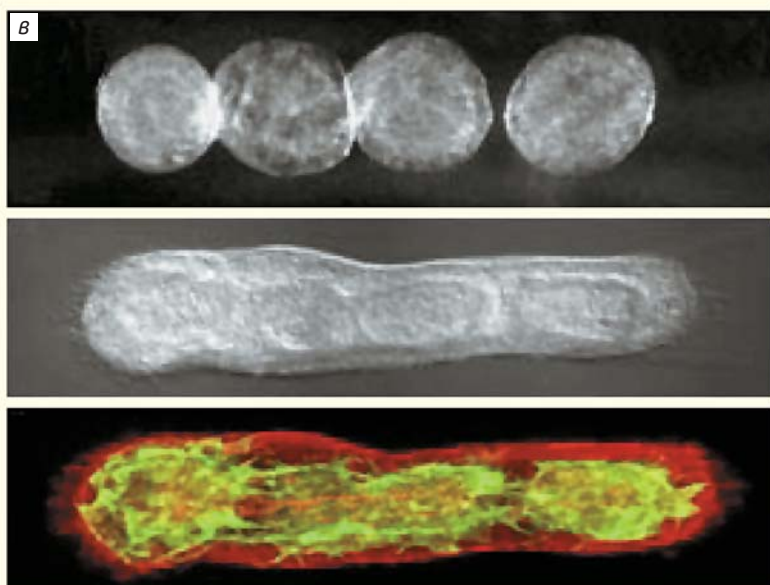
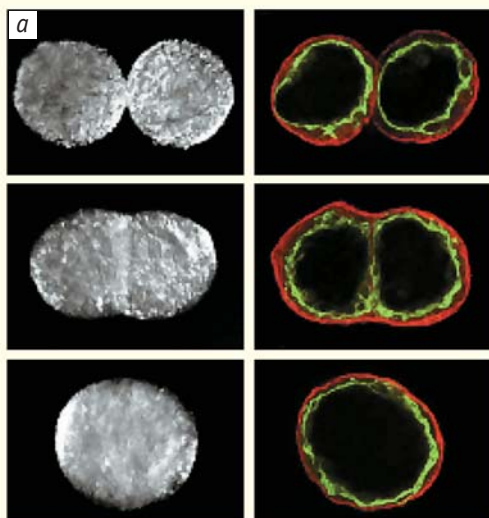
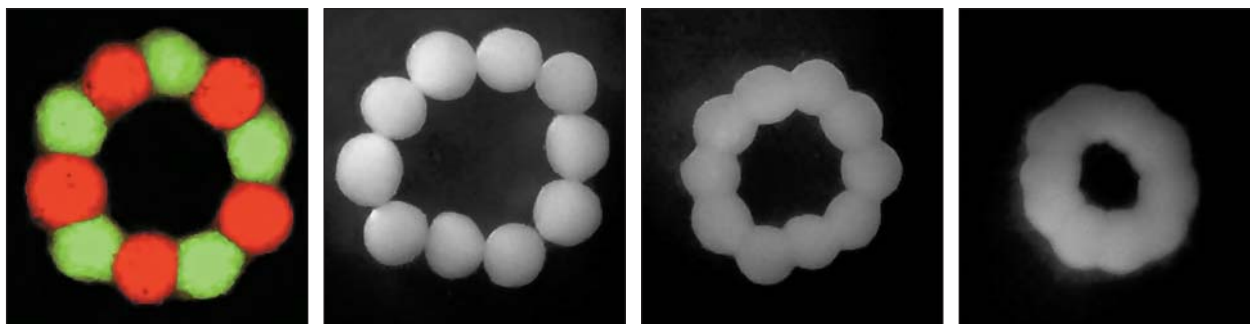
Выбор клеток, сохранение их жизнеспособности во время биопечати, взаимодействие с твердыми биоматериалами и гидрогелями, направленная дифференцировка и т.д. — безусловно, очень важные, но не ключевые биологические проблемы технологии 3D-bioprinting, без решения которых она просто не будет работать. Ее судьба зависит от трех принципиальных задач, которые стоят перед нами сегодня. Первая из них — разработка массового производства тканевых сфероидов стандартных размеров и сложной внутренней структуры.

За последние пять лет разработаны несколько таких методов. Один из них — усовершенствованный (роботизированный) метод выращивания клеточных культур по типу «висячей капли», созданный выдающимся русским гистологом А.А.Максимовым. В других случаях для формирования тканевых сфероидов используют неадгезивные (т.е. не взаимодействующие с клетками) гидрогели. Специалисты по высокоскоростной капельной микрофлюидике* разработали метод для создания капелек гидрогеля (полимеросом), в которые инкапсулированы клетки. Такие структуры обладают биоразлагаемыми и биосовместимыми мембранами.

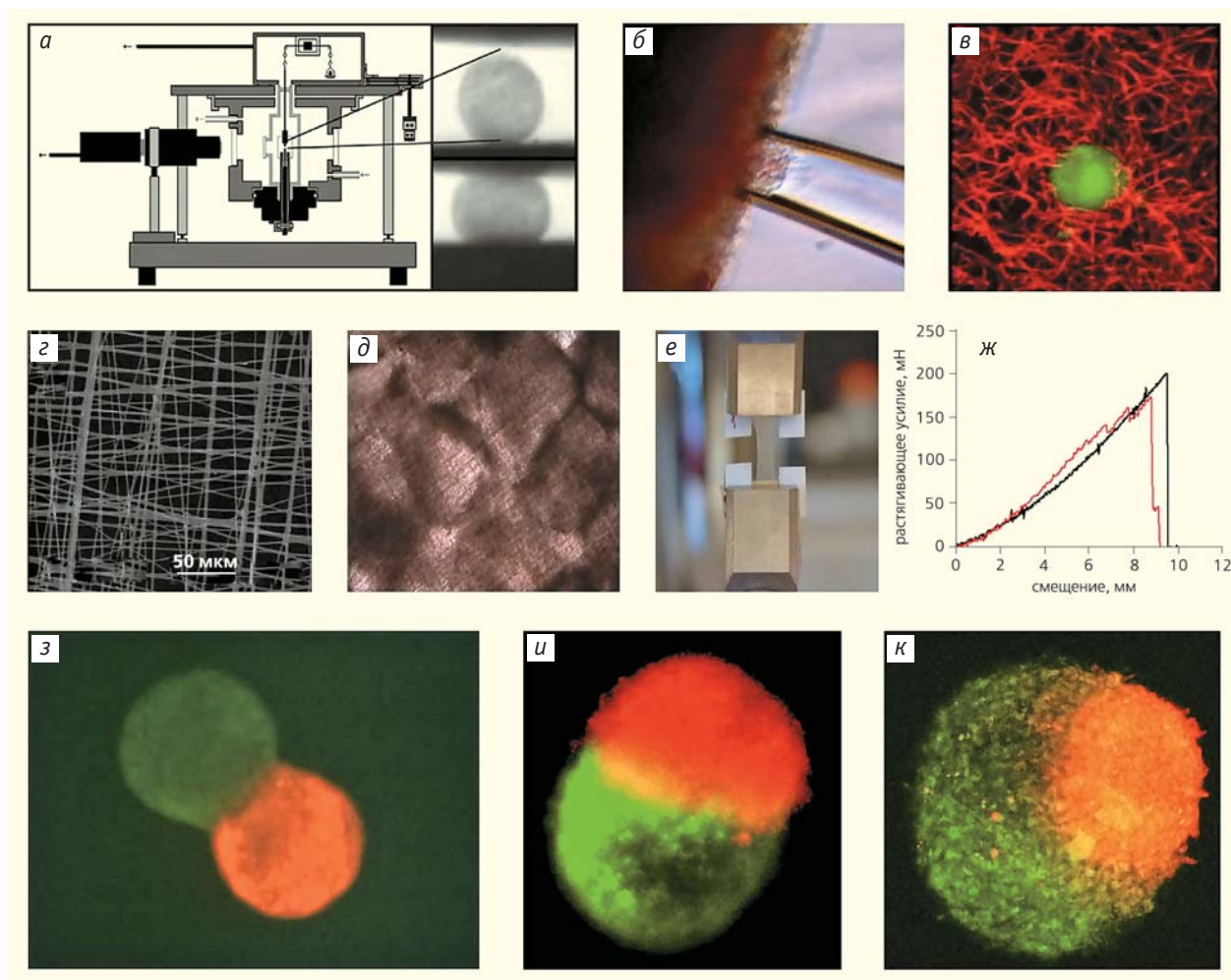
Вторая важнейшая задача — васкуляризация напечатанных биоконструкций. Ясно, что если не снабдить их кровеносной системой, они обречены на гибель. Настоящим прорывом в этом деле стали методы печати сосудистой системы с использованием водорастворимых, на основе сахаров, полимеров (их называют «sacrificial» — жертвенными). Так образуются микроканалы, которые впоследствии подвергаются перфузионной эндотелизации [7]. Формирования сосудистого просвета можно также добиться за счет смерти клеток, временно заполняющих просвет сфероидов. Полагаю, что наиболее перспективно сразу использовать люменизированные (от англ. luminal — просвет) сфероиды, которые при слиянии образуют полноценную сосудистую сеть. Однако не так важно, какие именно сфероиды (с просветом или без), в любом случае они позволят напечатать орган с уже встроенной ветвящейся сосудистой системой. И тому уже есть и теоретическое, и частично экспериментальное подтверждение [6, 7].

В решении третьей задачи — разработке эффективных и надежных методов быстрого тканевого созревания напечатанных тканей — пока достигнут не столь значительный прогресс, хотя и здесь уже есть очень интересные наработки. Например, три независимые группы исследователей показали, что сосуды, сделанные только из клеток (т.е. без использования каких-либо твердых поддерживающих каркасов, или скаффолдов), могут быстро созревать в биореакторе и приобретать свойства, сопоставимые со свойствами натуральных кровеносных сосудов [8]. Это означает, что клетки, если они изначально плотно прижаты друг к другу, довольно быстро начинают синтезировать достаточное количество структурных белков (коллагена и эластина), которые определяют механические свойства стенки сосудистой ткани. По сути, это прямо доказывает справедливость нашей концепции — печатать ткани можно без использова-

* Микрофлюидика (от греч. μικρός — малый и лат. fluidis — текучий) — междисциплинарная наука, описывающая поведение малых (порядка микро- и нанолитра) объемов и потоков жидкости. — *Примеч. ред.*



Биопечать элементов сосудистой сети из сфероидов разного типа [6]. Для изготовления крупных сосудов используются так называемые солидные, т.е. без просвета, сфероиды. На микрофотографиях в верхнем ряду видно, как сфероиды постепенно сливаются и образуют кольцо. Из нескольких кольцевых конструкций можно сложить тканевую трубку. Однако чтобы получить мелкие капилляры и их разветвления, как на представленной модели (б), лучше использовать люменизированные (с просветом) сфероиды. При их слиянии в «висячей капле» (а) или в гидрогеле (в) можно изготовить трубкообразные конструкции любой длины, а также добиться их разветвления (г). Важно, что при таком способе получения сосудов создается полноценная кровеносная система органа: на микрофотографиях видно, что в биоконструкциях присутствуют и эпителиальные (красная метка), и эндотелиальные клетки (зеленая метка).



Методы тестирования скаффолдов, сфероидов и изготовленных из них биоконструкций: тензиометрия — экспериментальная оценка изменения формы сфероида до и после сжатия (а); аспирационный метод — определение механических свойств тканевых сфероидов путем их всасывания (б); флуоресцентный анализ (в); сканирующая электронная микроскопия для проверки эластичности скаффолда (г) и закрепленных на нем слившихся сфероидов (д); испытание на растяжение таких биоконструкций (е, ж); анализ способности различных сфероидов к слиянию (з—к) [6].

ния твердых скаффолдов. Но пока это лишь начало, хотя и весьма обнадеживающее.

Кроме того, напомним, что в технологии биопечати заложена фундаментальная биологическая основа — феномен слияния тканей. Интересно, что впервые этот феномен был обнаружен и экспериментально продемонстрирован почти 100 лет назад. В 1907 г. морской биолог Генри ван Петерс Вилсон описал слияние и регенерацию морских губок, предварительно измельченных путем продавливания сквозь сито*. Наверняка этот ученый не мог себе даже на минуту представить, что его наблюдения приведут к последующему систематическому изучению клеточных и молекулярных механизмов клеточной адгезии и тканевой ассоциа-

ции и, таким образом, заложат биологическую основу технологии печатания органов.

В последнее время много внимания уделяется изучению клеточного цитоскелета**. Например, установлено, что разрушение его актиновых компонентов не только мешает сборке клеточных суспензий, но и препятствует слиянию уже сформированных тканевых сфероидов. В связи с этим разрабатываются методы, позволяющие оценивать свойства тканевых сфероидов в пассивном и активном состоянии [9]. В каких-то ситуациях их эффективно слиянию может препятствовать гидрогель, в который они заключены [10]. Подбор идеального гидрогеля — еще одна сложная задача.

* Подробнее см.: Лавров А.И., Косевич И.А. Реагрегация клеток у губок // Природа. 2013. №2. С.87—90. — Примеч. ред.

** Подробнее см.: Алиева И.Б., Узбеков Р.Э. Цитоскелет — современный взгляд на архитектуру клетки // Природа. 2012. №10. С.16—23. — Примеч. ред.

От биопринтера к автоматизированной линии сборки органов

Биопринтер, как и печатный станок Гутенберга, — ключевой элемент печати, только не книг, а органов. Хотя существует несколько вариантов технологии 3D-bioprinting, требования к биопринтерам в основном общие. Любой из них должен быть оснащен роботом (точной позиционной трехмерной аксиальной системой), который управляет соплом, или автоматизированным шприцем. Перемещаясь в трех измерениях, он выделяет суспензию клеток с гидрогелем или отдельные тканевые сфероиды. За роботом следит автоматическое контрольное устройство с компьютером, чтобы виртуальная модель стала реальной структурой. Помимо дисперсионных биопринтеров существуют также их специализированные формы, основанные на лазерной и струйной технологиях [4]. Более того, уже есть новые экспериментальные модели, которые используют ударную акустическую волну и не имеют сопла как такового.

Долгое время наивно полагали, что для создания органов достаточно лишь одного биопринтера, но это не так. Речь уже идет об автоматизированной линии роботов, отчасти напоминающей конвейеры по производству автомобилей или линии сборки микропроцессоров в электронной промышленности. Линия производства человеческих органов будет включать специальные системы (сортеры) для выделения клеток, роботы по производству тканевых микросфероидов, собственно биопринтеры и перфузионные биореакторы. Сейчас в Бразилии мы разрабатываем виртуальный прототип будущего завода по изготовлению человеческих органов в промышленном масштабе. Виртуальное производство уже широко используется в качестве инструмента для планирования, разработки и анализа технологий, а также для тренировки и обучения персонала в современной авиационно-космической, автомобильной и нефтяной промышленности. Виртуальная линия по производству человеческих органов будет выполнять аналогичные задачи. Базовые компьютерные программы, позволяющие создавать такую виртуальную линию, уже разработаны — дело лишь за их применением для конкретной задачи.

Будущее биопечати

К настоящему времени с помощью технологии 3D-bioprinting уже созданы фрагменты кожи и хряща, наружное ухо и спинной диск, сегменты сосуда дерева и печени. Крупные фармакологические компании проявляют большой интерес к ним: напечатанные функциональные микротканевые структуры могут быть использованы для моделирования человеческих болезней *in vitro* и для токсикологических исследований, например для тес-

тирования новых лекарственных препаратов. Несколько крупных компаний взялись за производство коммерческих биопринтеров, и уже созданы их экспериментальные модели. Похоже, «дорожная карта» технологии трехмерной биопечати органов, предложенная нами десятилетие назад, успешно реализуется. По каким же направлениям ей предстоит развиваться в ближайшие годы?

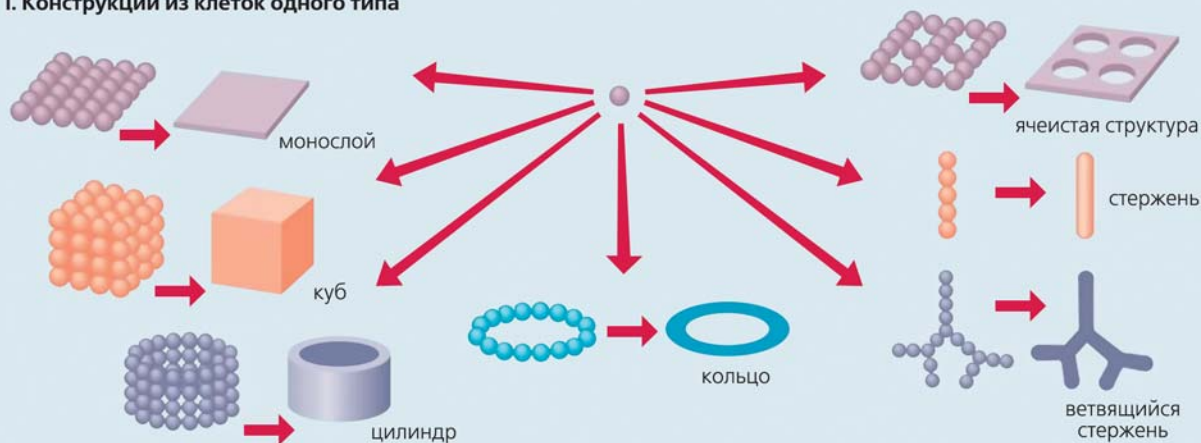
В последнее время становятся очень популярны так называемые гибридные технологии, когда комбинируются несколько уже известных подходов: например, одновременное печатание твердого полимера и гидрогеля со смешанными с ним живыми клетками или сочетание распыления твердого полимера методом электроспиннинга* со струйной печатью живых клеток. Вместе с бразильскими учеными мы разработали технологию встраивания тканевых сфероидов в твердые микроскафолды, способные к самосборке, которые назвали «lockyballs» (от англ. lock — блокировка и ball — мяч). Это своего рода «авоська» для сфероида, сделанная с помощью стереолитографии. На поверхности этой ажурной сферической конструкции есть подобные шипам репейника отростки, скрепляющие микроскафолды друг с другом, причем мгновенно и очень прочно, что недостижимо с помощью существующих гидрогелей, для полимеризации которых требуются время и токсичные фотоактиваторы. Однако наша разработка не отменяет поиск новых биосовместимых гидрогелей и других биоматериалов. Несомненно, будут продолжены исследования и по всем другим направлениям и описанным ключевым биологическим проблемам технологии 3D-bioprinting. Пожалуй, самое перспективное направление, которое уже начали разрабатывать в нескольких странах, — это так называемая биопечать *in situ*, т.е. печать тканей непосредственно на больном в операционной. Это начавшееся сближение роботической хирургии с биопечатью может дать самые интересные результаты и проложит дорогу технологии 3D-bioprinting в клинику.

Создание в России мультидисциплинарного национального центра биофабрикации и трехмерной биопечати тканей и органов стало бы чрезвычайно важным шагом для развития регенеративной медицины. Это гарантировало бы существенный и достойный вклад нынешнего поколения российских ученых и биоинженеров в развитие этого перспективного направления биомедицинской науки и технологии.

В прошлом году в Москве создана компания «3D Bioprinting Solutions», которая в феврале текущего года получила статус организации, ассоциированной с инновационным центром «Сколково». Месяц назад уже открылась первая частная ла-

* Электроспиннирование (от англ. spinning — прядение) — «электропрядение», технология получения нановолокон в электрическом поле. — *Примеч. ред.*

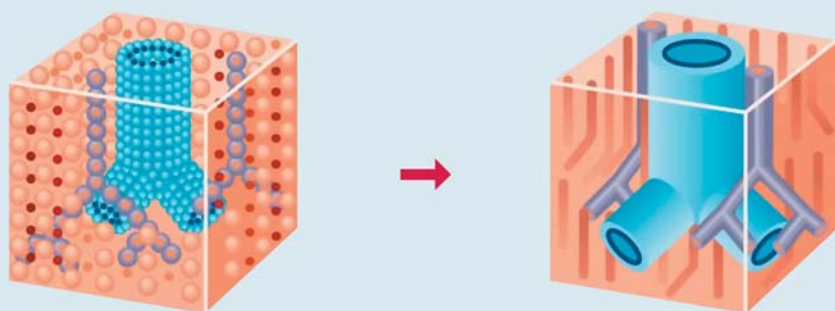
I. Конструкции из клеток одного типа



II. Структуры из клеток разного типа



III. Трехмерные васкуляризированные ткани и органы

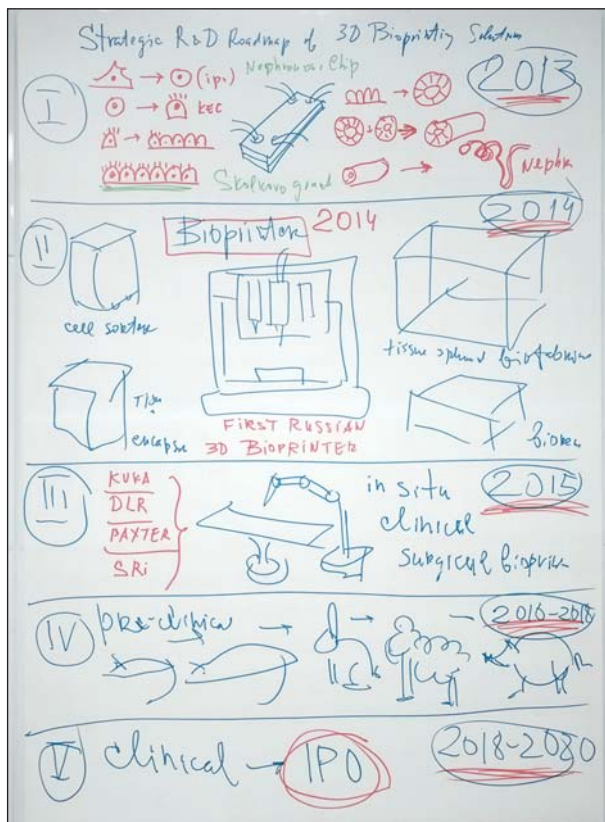


«Дорожная карта» технологии трехмерной печати органов. Показан постепенный переход от изготовления простых структур к сложным тканям и органам [3].

боратория биотехнологических исследований. Научная группа, в которой собраны ведущие специалисты в области регенеративной медицины, под руководством С.В.Новоселова начинает разрабатывать методы трехмерной биопечати для получения универсальных тканевых конструкций из аутологичных стволовых клеток пациента. Готовить их будут, вероятно, с помощью современного метода генетического репрограммирования,

возвращающего клетки в эмбриональное состояние*. Совместно с С.Л.Киселевым (руководителем отдела эпигенетики Института общей генетики им. Н.И.Вавилова РАН) мы планируем из индуцированных стволовых клеток человека полу-

* Подробнее см.: Киселев С. Л., Шутова М.В. Репрограммирование клеток: прыжок вверх по лестнице, ведущей вниз // Природа. 2010. №5. С.3—10.



Планы развития технологии трехмерной биопечати на рабочей доске в лаборатории «3D Bioprinting Solutions».

читать функциональные клетки почечного эпителия и проверить их на перфузируемом биочипе. По сути, это первый реальный шаг на долгом пути к напечатанной почке. На следующий год мы уже запланировали создание первого российского роботического биопринтера. Надеюсь, что не за горами и то время, когда мы начнем создавать искусственные органы и ткани, позволяющие полностью возвращать людям здоровье.

В 2000 г., в канун празднования миллениума, Британская библиотека и ряд журналов решили с помощью специально отобранных экспертов определить человека, сделавшего открытие (или создавшего технологию), которое оказало наибольшее влияние на жизнь человечества во втором тысячелетии. В числе кандидатов на звание «Man of Millenium» были Исаак Ньютон, Чарлз Дарвин, Альберт Эйнштейн, Томас Эдисон и многие другие выдающиеся ученые и изобретатели, но победителем стал первопечатник Гутенберг. Безусловно, «биопечатникам» еще есть над чем работать. Но судя по тому, как бурно развивается технология в последнее десятилетие, вполне возможно, первый искусственно напечатанный орган будет пересажен человеку уже в обозримом будущем. В случае успеха это станет одним из крупнейших достижений биомедицинской науки XXI в., которое, как первая пересадка натуральной почки Мюрреем, будет достойна Нобелевской премии. ■

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия исследованиям в штате Сан-Паулу (Foundation for Research Support of the State of San Paulo) и Бразильского совета по развитию науки и технологии (National Council for Scientific and Technological Development).

Литература

1. Langer R., Vacanti J.P. Tissue engineering // Science. 1993. V.260. №5110. P.920—926.
2. Rustad K.C., Sorkin M., Levi B. et al. Strategies for organ level tissue engineering // Organogenesis. 2010. V.6. №3. P.151—157.
3. Mironov V., Boland T., Trusk T. et al. Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering // Trends Biotechnol. 2003. V.21. №4. P.157—161.
4. Derby B. Printing and prototyping of tissues and scaffolds // Science. 2012. V.338. №6109. P.921—926.
5. Hajdu Z., Mironov V., Mebesz A.N. et al. Tissue spheroid fusion-based in vitro screening assays for analysis of tissue maturation // J. Tissue Eng. Regen. Med. 2010. V.4. №8. P.659—664.
6. Mironov V., Visconti R.P., Kasyanov V. et al. Organ printing: tissue spheroids as building blocks // Biomaterials. 2009. V.30. №12. P.2164—2174.
7. Visconti R.P., Kasyanov V., Gentile C. et al. Towards organ printing: engineering an intra-organ branched vascular tree // Expert Opin. Biol. Ther. 2010. V.10. №3. P.409—420.
8. Marga F., Jakob K., Khatiwala C. et al. Toward engineering functional organ modules by additive manufacturing // Biofabrication. 2012. V.4. №2. P.1—12.
9. Gonzalez-Rodriguez D., Guevorkian K., Douezan S. et al. Soft matter models of developing tissues and tumors // Science. 2012. V.338. №6109. P.910—917.
10. Jakob K., Neagu A., Mironov V. et al. Engineering biological structures of prescribed shape using self-assembling multicellular systems // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2004. V.101. №9. P.2864—2869.

Взаимодействие наносистем на расстоянии

А.И.Волокитин

Открытая более 60 лет назад поразительная связь между флуктуациями и силами теперь повсеместно применяется в физике. Сегодня интерес к силам Казимира испытывает своеобразный «ренессанс» благодаря созданию техники ультрачувствительной регистрации сил и активной разработке наноэлектромеханических систем. Оказывается, те же самые флуктуации электромагнитного поля, которыми порождаются силы Казимира, при относительном движении тел приводят к трению Казимира.

От флуктуаций к взаимодействию

Существуют четыре известных фундаментальных взаимодействия: электромагнитное, гравитационное, слабое и сильное. Слабое и сильное обнаруживают себя в масштабах порядка размеров ядра, а при больших расстояниях преобладают электромагнитные и гравитационные силы. Поэтому стало неожиданным, что два макроскопических немагнитных и незаряженных тела, даже не имеющие постоянного дипольного момента, могут испытывать притяжение, значительно превышающее гравитационное. Эта сила была предсказана в конце 1940-х годов Генриком Казимиром [1]. Ее существование — одно из немногих мак-



Александр Иванович Волокитин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Самарского государственного технического университета. Область научных интересов — физика наноструктур, нанотрибология, сканирующая зондовая микроскопия.

роскопических проявлений квантовой механики (наряду со сверхтекучестью, сверхпроводимостью, каонными и нейтринными осцилляциями и спектром излучения абсолютно черного тела). В свое время А.Эйнштейн, получивший Нобелевскую премию за работу по теории броуновского движения, установил связь между флуктуациями и трением — через соотношение между коэффициентом диффузии, продуктом случайной силы, и коэффициентом трения. Казимир рассмотрел роль флуктуаций с другой стороны. Он впервые осознал, что изменение энергии нулевых колебаний электромагнитного поля при изменении расстояния между телами приводит к консервативной силе, которая в настоящее время носит его имя. Эйнштейн во время написания своей знаменитой статьи еще ничего не знал о квантовых флуктуациях. Теория флуктуирующего электромагнитного поля также была разработана значительно позже. Поэтому силы, связанные с консервативным и диссипативным взаимодействиями посредством флуктуирующего электромагнитного поля, принято называть силами Казимира и трением Казимира соответственно.

Природа сил Ван-дер-Ваальса и Казимира связана с квантовыми и тепловыми флуктуациями. Квантовые флуктуации обусловлены соотношением неопределенностей Гейзенберга, согласно которому движение в квантовой системе не останавливается даже при абсолютном нуле температуры $T = 0$ К, а тепловые — следствие теплового «блуждания» микрочастиц. неполярная молекула всегда имеет флуктуирующий дипольный момент за счет квантовых и тепловых флуктуаций. Им создаваемое флуктуирующее электрическое поле будет индуцировать дипольный момент в расположенной на расстоянии d соседней молекуле. Взаимодействие между первым и вторым

дипольными моментами молекул приводит к дальнедействующему, дисперсионному взаимодействию Ван-дер-Ваальса, которое соответствует притяжению и при малых расстояниях $d < \lambda_0 = c/\omega_0$ (c — скорость света, ω_0 — частота поглощения молекулы) меняется с расстоянием как d^{-6} . Однако при больших расстояниях ($d > \lambda_0$) должны учитываться эффекты запаздывания, связанные с конечностью скорости распространения света, что дает взаимодействие Казимира-Полдера, которое при больших расстояниях меняется как d^{-7} .

Казимир обосновал свое предсказание в рамках упрощенной модели, в которой рассматривались две параллельные идеально проводящие пластины, разделенные вакуумом. Рассматривая вклад мод электромагнитного поля в энергию нулевых колебаний, он предсказал силу притяжения между пластинами. Так как в пространстве между пластинами могут существовать только электромагнитные моды, которые имеют узлы на поверхности пластин, частоты мод зависят от расстояния между пластинами, что приводит к силе

$$\frac{F_c}{A} = \frac{\hbar c \pi}{240 d^4} = \frac{1.3 \times 10^{-27}}{d^4} \text{ Н/м}^2,$$

где A — площадь пластин. На расстояниях порядка 10 нм сила Казимира по действию эквивалентна атмосферному давлению (101.3 кПа). Взаимодействие в данном случае соответствует притяжению, так как плотность мод в свободном пространстве больше, чем между пластинами. Единая теория сил Ван-дер-Ваальса и Казимира между плоскими параллельными пластинами, разделенными вакуумной щелью в условиях теплового равновесия, была разработана Е.М.Лифшицем (1955) [2]. Для расчета флуктуирующего электромагнитного поля Лифшиц использовал теорию С.М.Рытова (1953). Сила Казимира определяется суммой вкладов за счет квантовых и тепловых флуктуаций. Квантовые флуктуации доминируют при малых расстояниях ($d < l_T = \hbar c/kT$), а тепловые — при больших ($d > l_T$). В противоположность вкладу в силы Казимира за счет квантовых флуктуаций, который изучается экспериментально уже давно, тепловой вклад был измерен только что — для пластин из золота [3], и результаты подтвердили предсказания теории Лифшица. В настоящее время большое внимание привлечено к исследованию сил Казимира в графеновых структурах, поскольку теория предсказывает, что они ведут себя необычно по сравнению с силами в классических системах.

Притяжение графеновых листов

Графен, изолированный монослой углерода, который научились получать совсем недавно и за открытие которого А.Гейм и К.Новоселов [4] в 2010 г. были награждены Нобелевской премией, состоит из атомов углерода, плотно упакованных

в двумерную сотовидную кристаллическую решетку (рис.1). Уникальные электронные и механические свойства графена активно изучаются как теоретически, так и экспериментально из-за их важности для фундаментальной физики и возможных технологических приложений. В частности, валентная зона и зона проводимости в графене касаются друг друга в одной точке, называемой точкой Дирака. Вблизи этой точки энергетический спектр электронов и дырок имеет линейную дисперсию (т.е. энергия электрона зависит от его квазиимпульса линейно). За счет линейной (или «конической») дисперсии электроны и дырки вблизи этой точки ведут себя как релятивистские частицы, описываемые уравнением Дирака для безмассовых фермионов (для частиц с ненулевой массой, как известно, дисперсионная зависимость — квадратичная).

Из-за необычных электронных свойств графена силы Казимира в графеновых структурах тоже демонстрируют необычное поведение. Для нормальных материалов вклад тепловых флуктуаций в силу Казимира доминирует при $d > l_T$, однако для двух графеновых листов он превалирует и при значительно более коротких расстояниях $d > \zeta_T = \hbar v_F / kT$, где $v_F \sim 10^6$ м/с — скорость Ферми в графене. При комнатной температуре параметры ζ_T и l_T равны 25 нм и 7.6 мкм соответственно. На практике важное значение имеет возможность управления силами Казимира. Управлять тепловой компонентой силы Казимира можно, изменяя концентрацию носителей заряда в графене путем «настройки» уровня Ферми при помощи затворного напряжения. В графеновых структурах на силы Казимира и радиационную передачу тепла можно также воздействовать, пропуская электрический ток через образец. Благодаря гигантской подвижности носителей заряда в графене электроны (или дырки) в сильных электрических полях могут дви-

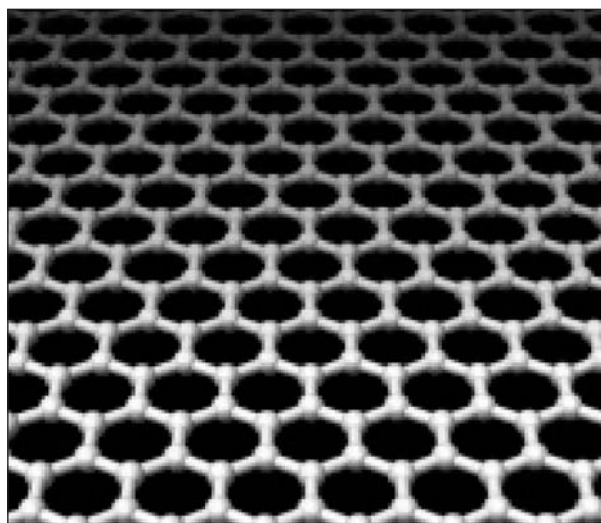


Рис.1. Сотовидная решетка графена.

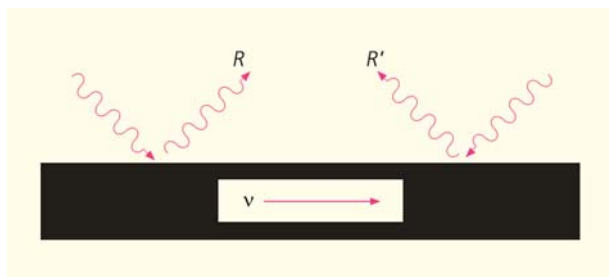


Рис.2. Отражение от поверхности движущегося тела электромагнитных волн, распространяющихся в разных направлениях. «Догоняющие» и «встречные» волны будут испытывать противоположный сдвиг частоты за счет эффекта Доплера. Вследствие частотной дисперсии амплитуды отражения эти волны по-разному отражаются от поверхности движущегося тела, что приводит к изменению сил Казимира. Асимметрия отражения электромагнитных волн ответственна также за трение Казимира (см. ниже).

гаться с очень большой скоростью ($v \sim 10^6$ м/с). Дрейфовое движение носителей заряда будет приводить к изменению отражающей способности графена за счет эффекта Доплера (рис.2). Это повлечет за собой изменение сил Казимира и радиационной передачи тепла [5]. На рис.3,а показана зависимость тепловой и квантовой составляющих силы Казимира между двумя графеновыми листами от расстояния d между последними. Тепловой вклад вычислялся при $T = 600$ К для двух скоростей дрейфа: нулевой и $2 \cdot 10^2$ м/с; он становится больше квантового при $d > 50$ нм. При $d < 5$ нм тепловой вклад для $v = 2 \cdot 10^2$ м/с значительно больше, чем вычисленный при $v = 0$. Например, при $d \approx 3$ нм дрейфовое движение электронов приводит к увеличению теплового вклада в силу Казимира в 10 раз. В этом случае он только на один порядок меньше квантового и может быть измерен экспе-

риментально. На рис.3,б изображена зависимость тепловой силы Казимира F_{zT} от скорости дрейфа электронов в графеновом листе при $d = 1$ нм. Существенное изменение тепловой составляющей возникает при $v/d > \omega_T = kT/\hbar$ (при комнатной температуре и для $d = 1$ нм это условие соответствует скоростям $v > 10^5$ м/с). Изменение особенно велико в случае резонансного туннелирования фотонов. Если в системе отсчета, движущейся со скоростью дрейфа электронов v , в электронном ансамбле возникает возбуждение с энергией $\omega_{eb}(q)$, то в лабораторной системе отсчета, относительно которой электроны движутся со скоростью v , за счет эффекта Доплера энергия возбуждения будет равна $\omega_{eb}(q) - q_x v$ (q_x — параллельная поверхности компонента волнового вектора q , $\omega_{eb}(q)$ — энергия возбуждения электронно-дырочной пары). При $v > \omega_{eb}(q)/q_x$ энергия возбуждения будет отрицательной. Это означает, что при скоростях, больших критической ($v_{кр} = \omega_{eb}(q)/q_x$), в результате возникновения возбуждения может родиться фотон с энергией $\omega_{pb}(q) = q_x v - \omega_{eb}(q)$, т.е. возникает излучение. Это излучение напоминает излучение Черенкова, которое сопровождает движение электрона в среде со сверхсветовой скоростью. Различие состоит в том, что черенковское излучение — это распространяющиеся электромагнитные волны, а излучение, которое возникает при движении электронной системы, — неоднородные волны, иначе говоря, последнее может возникать только при наличии другого тела, относительно которого движется электронная система. Резонанс возникает в том случае, когда фотон, испускаемый движущейся электронной системой с энергией $\omega_{pb}(q) = q_x v - \omega_{eb}(q)$, будет создавать возбуждение с такой же энергией $\omega_{eb}(q)$ в другом, но эквивалентном графеновом листе, т.е. условие резонанса имеет вид $q_x v - \omega_{eb}(q) = \omega_{eb}(q)$, или $q_x v = 2\omega_{eb}(q)$. В случае графена энергия возбуждения электронно-дыроч-

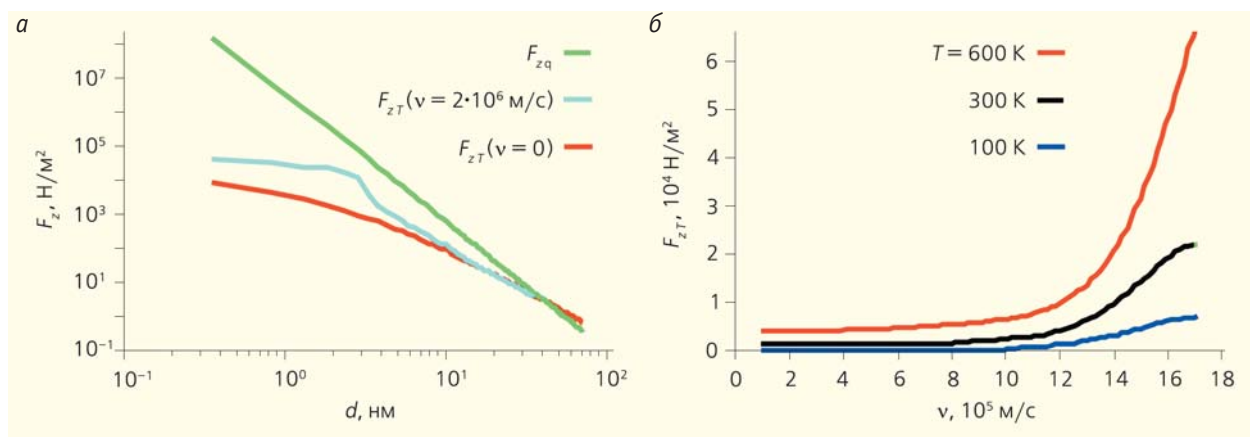


Рис.3. Силы Казимира между графеновыми листами при концентрации носителей заряда $n = 10^{16} \text{ м}^{-2}$. На зависимости силы Казимира от расстояния d между графеновыми листами квантовый F_{zq} и тепловой F_{zT} (при двух значениях дрейфовой скорости и $T = 600$ К) вклады в силу Казимира показаны раздельно (а). Для тепловых вкладов приведена зависимость от скорости дрейфа носителей заряда в одном графеновом листе при $d = 1$ нм (б).

ной пары $\omega_{об}(q) \approx v_F q$, где v_F — скорость Ферми. Таким образом, резонанс возникает, когда $q_x v = 2v_F q$, откуда следует, что резонанс возникает при условии $v > 2v_F \approx 2 \cdot 10^6$ м/с.

А теперь — о трении

Уже более 30 лет физиков интересует вопрос о том, как видоизменяются взаимодействие Казимира—Лифшица и радиационная передача тепла при учете относительного движения тел. Ряд исследователей показали [6], что перемещение тел относительно друг друга приводит к появлению силы трения. Теория предсказывает, что сила трения действует даже при абсолютном нуле температуры, когда она определяется квантовыми флуктуациями. Природа трения Казимира тесно связана с силами Казимира. Если тела находятся в относительном движении, то поляризация, индуцируемая в одном теле, будет отставать от флуктуирующей поляризации в другом — той, которая служит первоисточником индуцируемой. Это отставание и лежит в основе трения Казимира. Взаимодействие Казимира в основном реализуется за счет обмена между телами виртуальными фотонами, связанными с квантовыми флуктуациями (тепловые флуктуации начинают заметно сказываться на силах только при большом расстоянии между телами, когда вклад от квантовых флуктуаций становится очень мал). Напротив, трение Казимира чаще обусловлено обменом между телами реальными фотонами — при малых скоростях скольжения ($v < dkT/h$) это обмен тепловыми фотонами, связанными с тепловым излучением. Однако при больших скоростях и низких температурах ($v > dkT/h$) на первый план снова выходит обмен виртуальными фотонами, возникающими в результате относительного движения квантовых флуктуаций [6].

Природа трения Казимира может быть также объяснена эффектом Доплера. Согласно Дж. Пендери (1997), разница в доплеровском сдвиге частоты для двух волн, отражающихся от движущихся в противоположных направлениях поверхностей, приводит к трению, если амплитуда отражения зависит от частоты (рис.2). С точки зрения квантовой механики в возникновении трения Казимира участвуют процессы двух типов [6]: возбуждения (фотоны с равными и противоположно направленными импульсами) могут возникать в обоих телах, или же возбуждение исчезает в одном теле и рождается в другом. Первый процесс возможен даже при нулевой температуре, когда он обеспечивает квантовое трение, а второй — только при конечных температурах, когда он вносит вклад в трение Казимира за счет теплового излучения. Квантовое и тепловое трение Казимира определяется квантовыми и тепловыми флуктуациями соответственно.

Важно отметить, что квантовое трение существует только между близко расположенными телами. Для тела, которое движется в абсолютном вакууме, квантовое трение (в отличие от теплового) равно нулю, в согласии с принципом относительности, по которому тело не может испытывать трения, если оно движется в абсолютном вакууме при $T = 0$ К.

Что можно измерить...

Трение Казимира задает тот предел, до которого может быть уменьшено трение. Поэтому для того, чтобы его зарегистрировать, необходимо снизить влияние других механизмов трения до беспрецедентного уровня. Однако даже в экспериментах по бесконтактному трению, когда тела не находятся в прямом контакте, имеются несколько конкурирующих механизмов трения [6]. К тому же квантовое трение доминирует над тепловым лишь при скоростях $v > dkT/h$, что при $d = 1$ нм и комнатной температуре дает $v > 10^5$ м/с. А в экспериментах по измерению бесконтактного трения с помощью атомного силового микроскопа скорость сканирования зондом не превышает 1 м/с.

Но трение Казимира можно изучать не только с помощью измерения силы трения при относительном скольжении двух поверхностей. Другой, более элегантный способ наблюдения состоит в пропускании тока через одну металлическую пластину и изучении эффекта фрикционного увлечения в расположенном поблизости второй (параллельной) металлической пластине (рис.4).

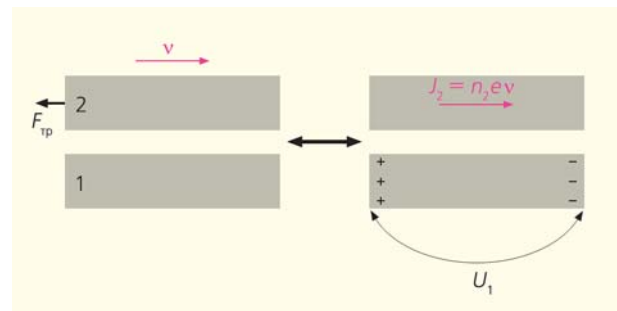


Рис.4. Электрический вариант измерения силы трения (справа), эквивалентный классическому (слева). За счет переноса электромагнитными волнами импульса между электронами двух проводников, разделенных вакуумным промежутком, между поверхностями последних возникает фрикционное сдвиговое напряжение. Его можно измерить, если не передвигать проводники (как слева), а приложить к одному из них (верхнему) напряжение, которое вызовет дрейфовое движение электронов проводимости (стрелкой показано направление движения электронов). Фрикционное напряжение, действующее на электроны нижнего, породит падение потенциала между противоположными торцами металла, которое легко обнаружить экспериментально.

Это явление, предсказанное независимо М.Б.Погребенским (1977) и Дж.Прайсом (1983), впервые наблюдалось для полупроводниковых 2D-квантовых ям группами Т.Грамылы (1991) и Ю.Сивана (1992). В экспериментах создавался ток в одной пластине, а вторая пластина служила частью разомкнутой цепи. За счет близости слоев межслойное взаимодействие посредством флуктуирующего электромагнитного поля (которое при малых расстояниях сводится к кулоновскому) «работало» трением, действующим на электроны во второй пластине. Так как ток во второй пластине протекать не мог, в ней возникало электрическое поле с напряженностью E , компенсирующее силу трения за счет взаимодействия с первой пластиной. В эксперименте дрейфовая скорость электронов $v \sim 10^2$ м/с. Согласно теории трения Казимира [6], при таких скоростях основной вклад в силу трения дают тепловые флуктуации.

Фрикционное увлечение между графеновыми листами было измерено недавно в работах [7, 8]. Скорость дрейфа носителей заряда v в этих экспериментах тоже была малой, поэтому учитывалась только тепловая составляющая фрикционного увлечения. Опыты на графеновых листах имеют значительные преимущества по сравнению с таковыми на квантовых ямах. Эксперимент можно проводить в вакууме, когда легко исключить вклад во фрикционное увлечение за счет обмена фононами. Кроме того, 2D-квантовые ямы в полупроводниках имеют очень низкую энергию Ферми $\epsilon_f \approx 4.8 \cdot 10^{-3}$ эВ. Поэтому электроны в этих квантовых ямах образуют вырожденный элек-

тронный газ только при очень низких температурах $T < T_f = 57$ К. Для графена при $n = 10^{12}$ см⁻² энергия Ферми $\epsilon_f = 0.11$ эВ, и электронный газ остается вырожденным для $T < 1335$ К. За счет гигантской подвижности носителей заряда в графене электроны (или дырки) там могут иметь значительно более высокую скорость дрейфа ($\sim 10^6$ м/с), когда сила фрикционного увлечения становится значительно больше и начинает доминировать вклад от квантовых флуктуаций.

Рисунок 5 демонстрирует зависимости силы фрикционного увлечения от скорости дрейфа носителей заряда при двух значениях расстояния между пластинами: 1 нм (а) и 10 нм (б). Вклады от тепловых и квантовых флуктуаций показаны раздельно. При $v < 10^5$ м/с сила трения сильно зависит от температуры, т.е. определяется тепловыми флуктуациями. Однако для $v > 10^6$ м/с начинает доминировать вклад от квантовых флуктуаций. Резкое усиление трения возникает в случае резонансного туннелирования фотонов [5]. Как обсуждалось выше, резонансное туннелирование фотонов возникает при $v > 2v_f \approx 2 \cdot 10^6$ м/с. При таких скоростях и при $d = 1$ нм квантовое трение доминирует над тепловым даже при комнатной температуре (см. рис.5,а), а при $d = 10$ нм — только при низких температурах (см. рис.5,б).

Недавно мы показали [9], что квантовое трение можно детектировать, измеряя вольт-амперные характеристики графенового полевого транзистора. Электроны, перемещающиеся в графене под действием электрического поля, будут испытывать внутреннее трение за счет взаимодействия с акустическими и оптическими фононами гра-

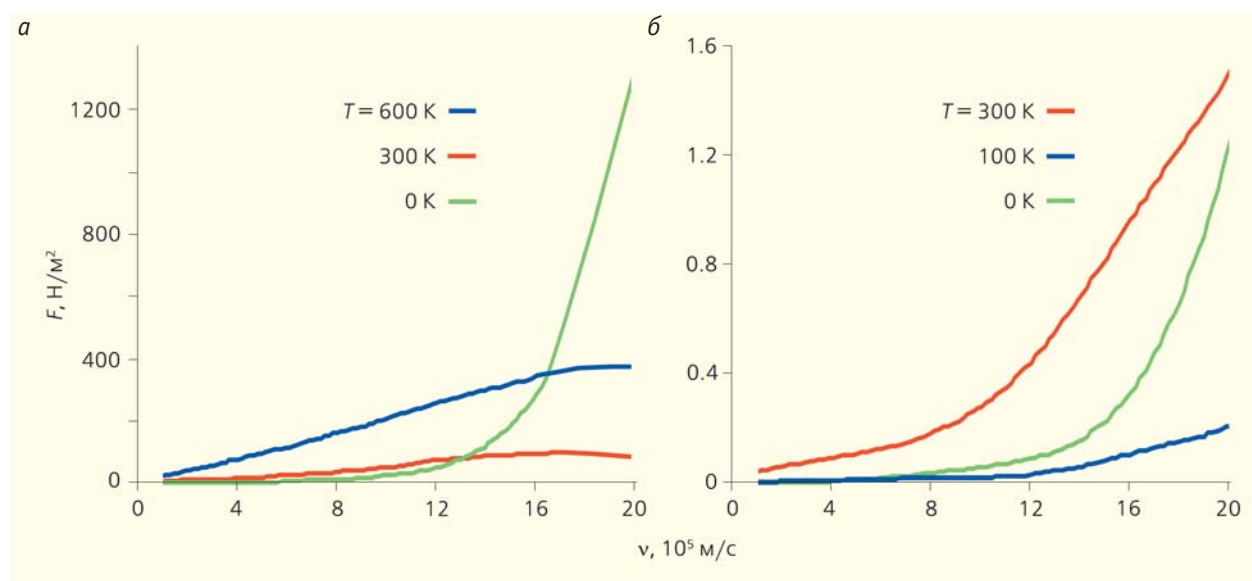


Рис.5. Сила фрикционного увлечения между двумя графеновыми листами при концентрации носителей заряда $n = 10^{12}$ см⁻². Изображены зависимости силы трения между графеновыми листами от скорости дрейфа носителей заряда, индуцируемой в одном графеновом листе, при расстоянии между листами $d = 1$ нм (а) и 10 нм (б). Графики при конечных температурах показывают только тепловой вклад в силу трения.

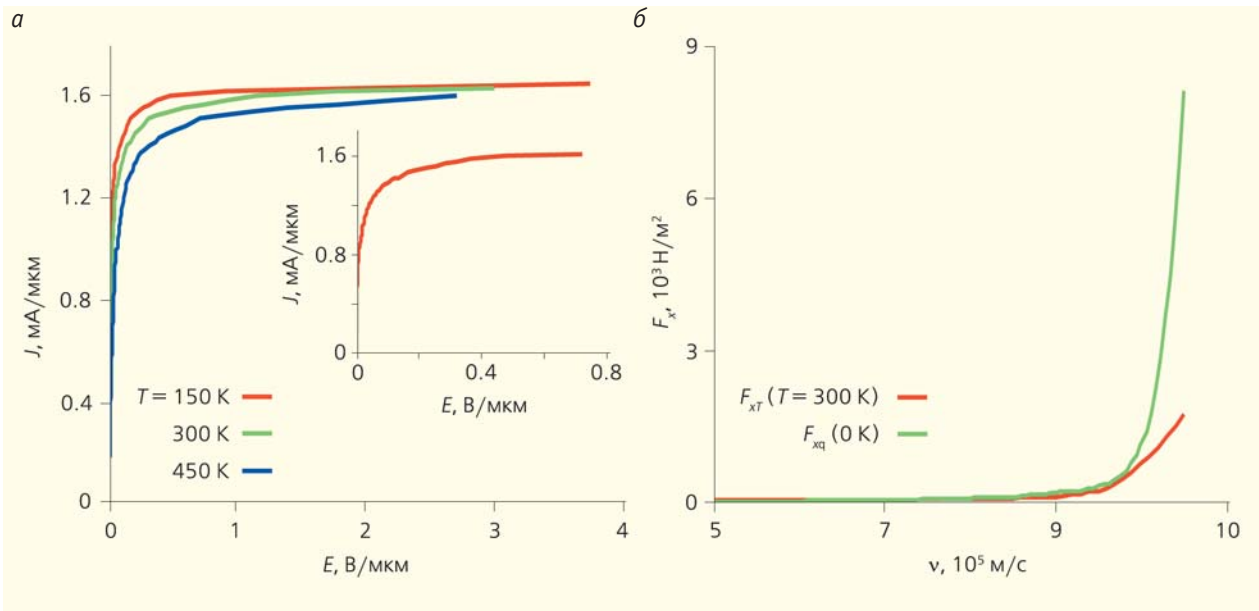


Рис.6. Влияние взаимодействия между оптическими фононами в SiO₂ и свободными носителями заряда в графене на электрические характеристики графенового полевого транзистора. Расстояние между графеном и SiO₂ равно 3.5 Å, концентрация свободных носителей заряда — 10¹²см⁻². Представлены зависимость плотности тока от напряженности электрического поля для различных температур (а, вставка показывает то же самое при T = 0 K) и зависимость квантового и теплового вкладов в силу трения между SiO₂ и свободными носителями заряда в графене от скорости дрейфа носителей заряда (б).

фена и внешнее трение за счет взаимодействия с оптическими фононами расположенной поблизости подложки из SiO₂. В сильных электрических полях электроны двигаются с большими скоростями, при этом основной вклад в трение дает взаимодействие с теми и другими оптическими фононами. Однако частота оптических фононов в графене приблизительно в четыре раза больше их частоты в SiO₂. Поэтому главную роль в трении будет играть взаимодействие с оптическими фононами в SiO₂; соответственно, им же определяется электропроводность графена в сильных электрических полях.

На рис.6,а изображена зависимость плотности тока J от напряженности электрического поля E для концентрации носителей заряда $n = 10^{12}$ см⁻² при различных температурах. Ток насыщения J_{sat} составляет примерно 1.6 мА/мкм, а скорость, при которой наступает насыщение, — около 10⁶ м/с. Ток насыщения слабо зависит от температуры — значит, он в основном управляется квантовыми флуктуациями. На рис.6,б приведены раздельно вклады в силу трения от квантовых и тепловых флуктуаций. Усиление трения при резонансном туннелировании фотонов возникает при условии (см. вышеприведенное обсуждение) $vq_x = \omega_{eb} + \omega_0$, где $\omega_0 \approx 60$ мэВ ($9 \cdot 10^{13}$ с⁻¹) — частота поверхностных фононных поляритонов для SiO₂. При малых расстояниях между графеном и подложкой характерное значение волнового вектора задается волновым вектором Ферми $k_F \approx 10^8$ м⁻¹. Таким образом,

сила трения сильно возрастает при резонансном туннелировании фотонов, когда $v > v_{\text{sat}} = \omega_0/k_F + v_F \approx 2 \cdot 10^6$ м/с.

...и чего ожидать

Силы Казимира и квантовое трение — макроскопическое явление, природа которого определяется квантовыми закономерностями. Идея о квантовых флуктуациях электромагнитного поля нашла применение в самых разнообразных областях физики. Например, с ее помощью были объяснены лэмбовский сдвиг атомного спектра и аномальный магнитный момент электрона.

Квантовые колебания электромагнитного поля обусловлены виртуальными фотонами — частицами, которые непрерывно рождаются и исчезают в вакууме. С помощью металлического зеркала, движущегося ускоренно с околосветовой скоростью, виртуальные фотоны можно превратить в реальные, что приводит к излучению зеркалом. В этом состоит динамический эффект Казимира; недавно его наблюдали в сверхпроводящем волноводе [10]. Существует очевидное сходство между излучением, которое возникает при динамическом эффекте Казимира, и излучением Хокинга, которое ответственно за квантовое испарение черных дыр.

Помимо фундаментального квантовые флуктуации имеют и большое прикладное значение.

В настоящее время ведется активная работа по созданию наноэлектромеханических систем, которые могут послужить в таких областях науки и техники, как зондирование, телекоммуникации, обработка сигналов, хранение информации и др. По этой причине интерес к силам Казимира возрос, так как они определяют взаимодействие между наноструктурами и ответственны за адгезию между движущимися частями в наноэлектромеханических системах.

Для практических применений важно научиться управлять силами Казимира. Из теории Лифшица следует, что если два тела поместить в жидкость, то при подходящем выборе материала тел притяжение между ними может смениться отталкиванием. В случае отталкивания силы Казимира—Лифшица могут обеспечить квантовую левитацию объектов в жидкости и привести к новому классу настраиваемых наномасштабных устройств с ультранизким статическим трением.

Квантовое трение определяет предел, до которого можно уменьшить силу трения, а следователь-

но, и флуктуации, так как, согласно установленному Эйнштейном соотношению, трение и флуктуации связаны друг с другом. С другой стороны, флуктуации влияют на точность измерения сил. Возможно, наиболее волнующее приложение этих идей связано с механическим детектированием ядерного спинового резонанса. К примеру, детектирование одиночного спина с помощью магниторезонансной силовой микроскопии (которая была предложена для получения изображения биологических объектов, таких как белки, с атомарным разрешением) и для квантового компьютера потребует уменьшения флуктуирующих сил (и, следовательно, трения) до беспрецедентного уровня.

Десять лет назад силы и трение Казимира были академическим курьезом. Сегодня это технологическая проблема: раз наноэлектромеханическим устройствам предвещают такое широкое амплуа в различных областях науки и техники, нужно научиться контролировать силы, господствующие в наномире. Квантовая механика стремительно становится квантовой инженерией. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 12-02-00061-а.

Литература

1. *Casimir H.B.G.* On the attraction between two perfectly conducting plates // *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 1948. V.51. P.793—795.
2. *Lifshitz E.M.* Теория молекулярных сил притяжения между конденсированными телами // *ЖЭТФ.* 1955. Т.29. С.94—110.
3. *Sushkov A.O., Kim W.J., Dalvit D.A.R., Lamoreaux S.K.* Observation of the thermal Casimir force // *Nature Phys.* 2011. V.7. P.230—233.
4. *Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science.* 2004. V.306. P.666—669.
5. *Волокитин А.И., Перссон Б.Н.Й.* Влияние электрического тока на силы Казимира между графеновыми листами // *Письма в ЖЭТФ.* 2013. Т.98. С.165—171.
6. *Volokitin A.I., Persson B.N.J.* Near-field heat transfer and noncontact friction // *Rev. Mod. Phys.* 2007. V.79. P.1291—1229.
7. *Kim S., Jo I., Nab J. et al.* Coulomb drag of massless fermions in graphene // *Phys. Rev. B.* 2011. V.83. P.161401.
8. *Gorbachev R.V., Geim A.K., Katsnelson M.I. et al.* Strong Coulomb drag and broken symmetry in double-layer graphene // *Nature Phys.* 2012. V.8. P.896—912.
9. *Volokitin A.I., Persson B.N.J.* Quantum friction // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V.106. P.094502.
10. *Wilson C.M., Johansson P., Pourkabirian A. et al.* Observation of the dynamical effect in a superconducting circuit // *Nature.* 2011. V.479. P.376—379.

Страна голубых лабиринтов

В.М. Михайлов



Северо-Восточная Сибирь, или, для краткости, Северо-Восток обладает целым рядом уникальных черт [1]. Одни из них широко известны, другие заметны лишь при более или менее пристальном взгляде, третьи — лежат в глубине недр. Здесь находится полюс холода Северного полушария, который долгое время был яблоком раздора между Верхоянском и Оймяконом (а скорее всего, он затерян где-то посреди редкой сети метеостанций). Здесь раскинулась самая обширная горная страна на территории бывшего СССР. Горы не отличаются высотой: немногие вершины имеют абсолютные отметки более 2500 м, но из-за крайне сурового климата и особенностей выветривания коренных пород уже на значительно меньших высотах доминируют щебнистые осыпи и скалы, лишь местами прикрытые скудной растительностью. Немного найдется мест, где на такой огромной территории столь же отчетливо проявляется угловатый костяк нашей планеты.



Владимир Матвеевич Михайлов, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Северо-Восточной научно-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН. Область основных научных интересов — талики речных долин, геологическая деятельность рек.

Северо-Восток и остальная Сибирь

Даже недолгое «путешествие» по общедоступным картам масштаба 1:10 000 000 позволяет определить самую яркую отличительную черту горной страны Северо-Востока: здесь почти все реки и ручьи (кроме самых малых) ветвятся на рукава среди широких аккумулятивных пойм. Первое впечатление не изменится и при взгляде на подробный аэрофотоснимок, и при непосредственном наблюдении.

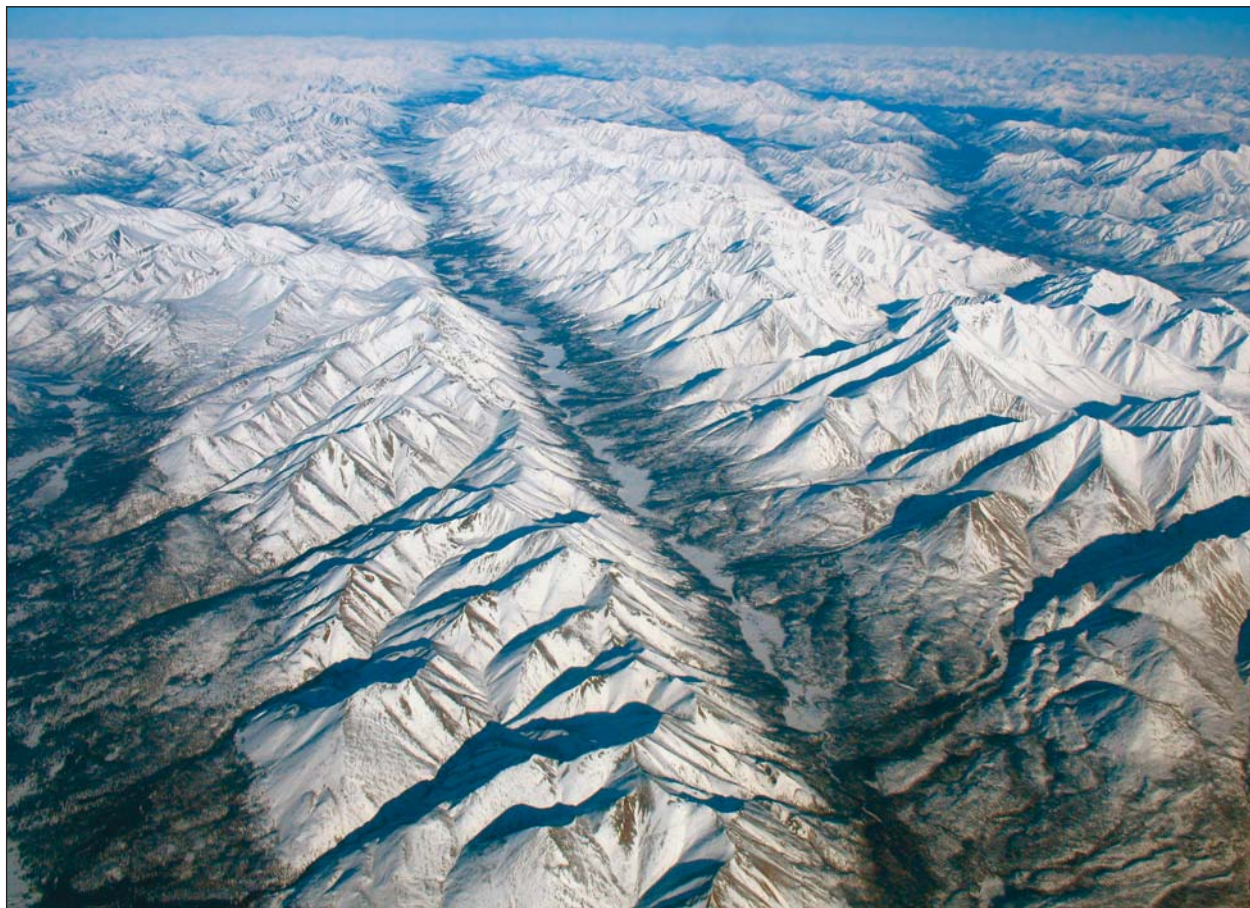
На сопредельных гористых территориях, равно как и в большинстве отдаленных горных районов, преобладают реки, текущие единым руслом: врезающиеся в скальные породы или (в сравнительно редких широкопойменных долинах) меандрирующие*. Немногочисленные исключения — например, всем известная Ангара — это чаще всего те же врезающиеся реки, в которых острова покоятся на скальных основаниях, зачастую высоко

* Меандрирование и извилистость — понятия близкие, но отнюдь не синонимичные. Извилистость в той или иной мере присуща всем естественным потокам, тогда как при меандрировании вся руслоформирующая деятельность реки сосредоточена на образовании, развитии и прорыве излучин. Еще один традиционно выделяемый тип — относительно прямолинейное неразветвленное русло — занимает в широкопойменных долинах промежуточное положение. Такие реки повсеместно малочисленны и представляют ограниченный интерес.

поднятых над водой. Различия, при некотором внешнем сходстве, принципиальны: в первом случае острова формирует (намывает и размывает) речной поток, перемещающий подвижные наносы; во втором его роль сводится к освоению ослабленных зон в коренных породах, относительно легко растворимых (карстующихся) или же разбитых на блоки системами трещин, в обход более консолидированных участков. Образующиеся таким путем устойчивые разветвления называют скульптурными.

Причины формирования реками, прекратившими врезание в скальные породы, ветвящегося либо меандрирующего русла — одна из центральных проблем флювиальной геоморфологии. В большинстве горных сооружений преимущество, часто подавляющее, принадлежит второму из них. Поэтому обратное соотношение, которое демонстрирует горная страна Северо-Востока, представляет собой своего рода наводящий вопрос, способный подсказать решение (хотя бы и частное, т.е. не распространяющееся напрямую на равнинные территории) основной задачи. Начать следует с краткой сводки необходимых для этого сведений (подробно они изложены в статьях [2, 3]).

В Сибири наибольшей популярностью у теле- и фотожурналистов пользуются бурные и порожистые реки Алтая и Саян, они же предоставляют водным туристам маршруты высших категорий сложности. Их живописность и прочие привлекательные черты (одним радующие глаз, другим щекокачущие нервы) складываются, если разобраться, из комбинаций всего-то нескольких основных элементов: водопадов, бурунов и скальных прижимов. С геологической точки зрения их наличие вызвано тем, что подобные реки находятся в самом начале фазы глубинной эрозии, т.е. усиленно врезаются в коренные породы. Это первая стадия эрозионного цикла, который «запускается» интенсивным тектоническим поднятием территории. После его прекращения глубинная эрозия со временем сменяется боковой (вторая стадия), а затем, когда река достаточно расширит свою долину, попутно выстелив ее аллювием, наступает фаза динамического равновесия. За время от на-



Южные отроги хребта Сунтар-Хаята поздней осенью. Тонкий слой свежеевыпавшего снега (местами сдутого ветром) выбелил возвышенные участки склонов, лишённые растительности.

Здесь и далее фото автора (исключение специально помечено)



Ветвящийся ручей Татынгычан в 8 км от истока.

чала образования гор до неизбежного, рано или поздно, их разрушения все реки проходят эти стадии — как правило, многократно. Кроме того, в некоторых долинах могут накапливаться аллювиальные толщи повышенной мощности. Обычно этот процесс компенсирует относительные опускания коренного ложа и развивается уже после наступления динамического равновесия, но может следовать и непосредственно за врезанием. По традиции соответствующий период в жизни реки также называют стадией, хотя он явно выпадает из общего ряда, не занимая в нем определенной позиции.

Среди гипотез о причинах формирования разветвленных русел полезно выделить одну (ранее популярную), согласно



Река Бююк Мендерес (юго-запад Турции) при впадении в Эгейское море и в верховьях (на врезке). Это не просто одна из множества меандрирующих рек; у древних эллинов она носила имя Меандр, дав его также и классическому орнаменту.
<http://sites.allegheeny.edu/gatorblogs/2011/08/23>

которой ветвление однозначно связано с направленной аккумуляцией аллювия. В настоящее время она практически не имеет сторонников, но все же содержит определенную долю истины, поскольку сильная перегруженность потока наносами действительно всегда вызывает разделение его на рукава. Эта «доля истины» будет обсуждаться подробнее несколько позже.

Реки, находящиеся в стадиях как глубинной, так и боковой эрозии, обладают достаточно четкими отличительными чертами и даже при небольшом навыке легко дешифрируются по картам и аэрокосмическим материалам. Чтобы распознать среди широкопойменных рек те, которые накапливают аллювий, нередко приходится учитывать менее отчетливые признаки, причем не всегда удается прийти к однозначному выводу. Но зато меандрирующие и ветвящиеся реки, одинаково присущие состояниям равновесия и накопления аллювия, различаются без труда.

Большая работа по картированию русел разных категорий и подсчету их протяженности была проделана в 60-х годах прошлого века ленинградским гидрологом С.И.Пиньковским [4—6].

Часть полученных им сведений ближе всего относится к обсуждаемой теме (таблица). При их анализе необходимо иметь в виду, что автор использовал своеобразную типизацию русел (далее его термины выделены полужирным шрифтом), несколько отличную от традиционных схем.

К **немеандрирующему** типу Пиньковского относится большинство рек, находящихся в стадии глубинной эрозии (кроме участков со скульптурными разветвлениями, которые отнесены к **разветвленному** типу). К **ограниченно меандрирующему** принадлежат в основном русла в стадии боковой эрозии, к нему же причислены и относительно прямолинейные неразветвленные участки широкопойменных рек.

Реки двух групп сибирских районов (Сахалин представляет собой особый случай, речь о котором пойдет позже) различаются настолько сильно, что это отчетливо видно непосредственно по приведенным в таблице данным, причем введение необходимых коррективов в целом лишь усиливает контраст.

За пределами Северо-Востока в горных сооружениях, несмотря на низкую неотектоническую

Таблица

Распространение типов речных русел в горных районах восточной части России (по С.И.Пиньковскому [4–6])

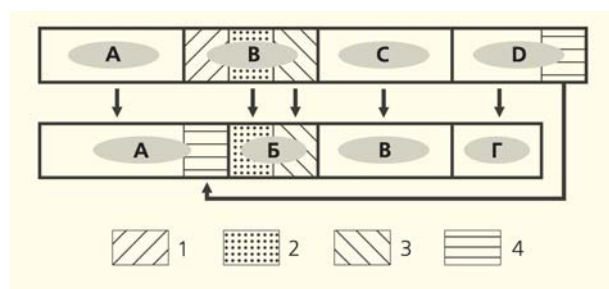
Районы	Суммарная длина участков по оси долины, по районам, км/%				Суммарная длина рек, км	Количество рек
	Типы речных русел					
	меандрирование		немеандрирующее	разветвленное		
	свободное	ограниченное				
Северо-Восточная Сибирь						
Яно-Чукотская горная страна	1276/3.72	1920/5.60	7925/23.09	23195/67.59	34316	522
Корякская группа горных хребтов	570/12.42	350/7.63	590/12.85	3080/67.10	4590	102
Юго-восточная половина хребта Сунтар-Хаята, Северный Охотский амфитеатр	180/6.64	105/3.87	500/18.45	1925/71.03	2710	27
Другие районы Сибири						
Алданское нагорье	555/10.47	445/8.40	4155/78.40	145/2.74	5300	74
Северо-Байкальское, Патомское нагорья, Лено-Алданское плоскогорье	1235/15.94	150/1.94	5940/76.65	425/5.48	7750	72
Средне-Сибирское плоскогорье	11840/25.46	2750/5.91	29350/63.10	2570/5.53	46510	378
Остров Сахалин						
	1255/54.68	180/7.84	835/36.38	25/1.08	2295	72

активность (преимущественно это плоскогорья), первостепенная роль принадлежит врезанным руслам. При этом числа, относящиеся к **немеандрирующему** типу, следует еще более увеличить за счет **разветвленного**. На общей протяженности участков, охваченных глубинной эрозией, такая операция скажется мало, но она существенно

уменьшит (по сравнению с данными Пиньковского) долю и без того малочисленных ветвящихся русел. Поэтому в категории широкопойменных рек свободно меандрирующие превосходят разветвленные не в три-четыре раза (как в таблице), а, скорее, на порядок.

По Пиньковскому, на Северо-Востоке русла, разветвленные на рукава, в общей сложности в 13 раз протяженнее свободно меандрирующих. Как и в предыдущем случае, их доля в действительности меньше, но поправка здесь очень мала. Легко видеть (см. табл.), что в остальных районах скульптурные разветвления занимают сотые доли от общей протяженности врезанных русел: длина всех **разветвленных** составляет менее 10% от всех **немеандрирующих**. Поскольку на Северо-Востоке доля **немеандрирующих** участков меньше в несколько раз и нет никаких оснований считать, что подобные разветвления распространены шире (на самом деле наоборот), то поправка здесь уменьшается даже в абсолютном выражении и вряд ли выходит за пределы 1%. Она никак не сказывается на общей картине подавляющего перевеса разветвленных русел.

Еще одна уникальная черта Северо-Востока кроется в его недрах. Хотя геологическая карта региона при беглом взгляде напоминает лоскутное одеяло, по большому счету ему присуща нечастая для гористых территорий литологическая однородность [3]. По широте распространения скальных пород *щебнистого типа* (подробнее об



Соответствие типов русел по С.И.Пиньковскому [4–6] категориям, рассматриваемым в статье. Типы Пиньковского: А — немеандрирующее русло; В — ограниченное меандрирование; С — свободное меандрирование; D — разветвленное русло. Рассматриваемые категории: А — врезанные русла стадии глубинной эрозии; Б — адаптированные русла стадии боковой эрозии; В, Г — широкопойменные русла (В — свободно меандрирующие, Г — разветвленные на рукава). Штриховкой выделены: 1 — широкопойменные относительно прямолинейные русла; 2, 3 — соответственно адаптированные излучины и разветвления; 4 — скульптурные разветвления.

этом в следующем разделе) Северо-Восток не имеет себе равных. В остальных районах, представленных в таблице, этот тип практически отсутствует; в большинстве других горных сооружений он также занимает подчиненное положение. Вряд ли две эти уникальные особенности возникли независимо одна от другой.

Дороги, которые не выбирают

Классику американской геоморфологии Л.Леопольду [7] принадлежит часто цитируемое высказывание, которое в вольном переводе звучит примерно так: «Река сама возводит собственный храм» (в оригинале «The river... is the carpenter of its own edifice»). Это неоспоримая истина: текущие воды — наиболее мощный агент преобразования не только долин, но и рельефа в целом. Но в роли архитекторов этого храма выступают факторы геологической природы.

Меандрирующие и ветвящиеся реки различаются не только рисунком русла, но и рядом количественных характеристик. Одна из основных — продольный уклон долины, который при равной водности существенно больше у ветвящихся рек. Сопоставим это положение с выводом магаданского геолога И.П.Карташова о причине перехода рек от глубинной эрозии к боковой [8]. После прекращения восходящих тектонических движений речной поток поначалу продолжает врезаться в скальные породы и при этом вырабатывает все более пологий продольный профиль. Скорость течения и транспортирующая способность уменьшаются, мощность донных наносов постепенно возрастает, их нижние слои все реже вовлекаются в движение. Со временем они становятся и вовсе неподвижными, даже в самые мощные паводки, и таким образом предохраняют подстилающие коренные породы от дальнейшего разрушения. Отсюда легко выводится очень важное следствие: в ходе дальнейшей «нормальной» эволюции реки (т.е. без вмешательства новых тектонических подвижек) продольный уклон ее долины, на данном этапе совпадающий с уклоном русла, *не изменяется* [3]. Значит, тип русла, который река сформирует при достижении динамического равновесия, закладывается уже на стадии врезания — в зависимости от того, с каким уклоном она завершает эту стадию.

В одной из своих работ В.М.Дэвис, которого часто называют отцом американской географии, проводит мысленный эксперимент по сравнению «двух рек, одинаковых по величине, из которых одна течет по возвышенности, сложной устойчивыми породами, а другая — по такой же возвышенности, но сложной легко размываемыми породами» [9, с.112]. Он приходит к заключению, что вторая река прекращает глубинную эрозию при большем уклоне долины из-за интенсивного поступления со склонов рыхлого материала. Ло-

гика автора справедлива, но лишь в определенных пределах. Как видно из таблицы, в горах Сахалина, сложенных чрезвычайно податливыми породами [2, 3], реки по завершении стадии врезания вырабатывают меандрирующие русла, соответствующие минимальным уклонам долин.

Рассмотрим вкратце особенности хода эрозионного цикла в коренных породах различных типов [3]. Ведущая роль в развитии реки принадлежит не общему количеству поступающего со склонов рыхлого материала, а содержанию в нем таких обломков, которые перемещаются в потоке путем скольжения, перекачивания, *сальтации* («подпрыгивания»). Именно эти (*влекомые*, или *руслоформирующие*) наносы образуют подвижное ложе реки; они же при достижении достаточной мощности защищают от эрозии ее коренное ложе. В земных условиях основную массу влекомых наносов горных рек составляют галька и ее неокатанный аналог — щебень.

Количество более мелких частиц, переносимых во взвешенном состоянии, реке по большому счету безразлично: для насыщения водного потока они должны составлять примерно половину общего объема взвеси. Даже такие реки, вода в которых, по расхожему выражению (родившемуся, по-видимому, на берегах Миссури), слишком жидкая, чтобы ее пахать, но слишком густая, чтобы пить (вариант — плавать в ней), все же весьма далеки от такого состояния.

Что касается более крупных фракций, то даже отдельные глыбы «перегружают» (в своем размерном классе) речной поток и в стадиях глубинной и боковой эрозии замедляют течение этих процессов.

По способности давать при выветривании обломки преимущественно того или иного размера большинство коренных пород подразделяются на три типа: щебнистые, глыбово-каменные и слабо литифицированные. Первые два имеют «говорящие» названия, породы третьего типа легко (хотя и не обязательно сразу) распадаются на частицы калибра взвешенных наносов [2, 3].

Возвращаясь к построениям Дэвиса и уточняя граничные условия, будем рассматривать участки врезающихся рек с одинаковой транспортирующей способностью (а следовательно, примерно с равными уклонами) в обстановке тектонического покоя. Допустим, что в данный фиксированный момент времени река, протекающая в породах щебнистого типа, завершает стадию врезания, т.е. в ней сформировался «предохраняющий» слой руслоформирующих наносов — за счет достаточно интенсивного поступления обломков соответствующей крупности.

Породы глыбово-каменного типа намного устойчивее к выветриванию, как на склонах, так и в водном потоке. Кроме того, в общем (сравнительно небольшом) объеме поступающего в него рыхлого материала велика доля таких обломков,

которые река перемещать не в состоянии, взаимодействуя с ними так же, как и с выступами коренных пород. Поэтому она при том же уклоне испытывает дефицит руслоформирующих наносов и вынуждена продолжать глубинную эрозию, одновременно стачивая загромождающие русло глыбы и камни до размера таких наносов. В результате эта стадия растягивается на весьма длительные сроки. Врезающиеся реки продолжают здесь доминировать даже при очень слабых восходящих движениях; особенно наглядно это видно на примере Среднесибирского плоскогорья (см. табл.). Их уклоны постепенно уменьшаются вплоть до значений, характерных для меандрирующих водотоков, склоны выколаживаются, скорость поступления и средний размер обломков уменьшаются, хотя частично они по-прежнему представлены глыбами.

В слабо литифицированных породах поступление рыхлого материала наиболее интенсивно, но щебень изначально не занимает в нем ведущих позиций. Более того, в водном потоке малопрочные влекаемые наносы быстро измельчаются при взаимных соударениях. В результате реки здесь не просто врезаются, а едва ли не «проваливаются» в отведенный им субстрат. Относительно высокая доля врезающихся русел на Сахалине (см. табл.) поддерживается за счет интенсивных восходящих движений. Несмотря на колоссальные различия в скоростях врезания, реки (при тех же равных уклонах) также испытывают дефицит руслоформирующих наносов и продолжают глубинную эрозию. В природе нередки парадоксы: завершение этой стадии как в самых крепких коренных породах, так и в наиболее податливых наступает в одинаково пологих долинах, тогда как в промежуточных по прочности породах щебнистого типа уклоны существенно больше.

Подведем итог: тип широкопойменного речного русла в горных сооружениях не только закладывается на ранних этапах развития реки — он фактически предопределен геологическим строением территории.

Продолжение эволюции: обретение формы

В стадии боковой эрозии все реки перенасыщены руслоформирующими наносами [3], но это перенасыщение особого рода — она не приводит к накоплению аллювиальных толщ повышенной мощности. Скорость поступления в русло рыхлого материала находится в прямой зависимости от интенсивности подрезания потоком коренных склонов долины и в то же время сама регулирует ее по принципу отрицательной обратной связи. Если на каком-то отдельном участке приход оказался больше, чем река способна переносить, то избыток обломков скапливается у подножия склона, предохраняя его от дальнейшего разру-

шения. Поток здесь на время оттесняется в сторону — до тех пор, пока он не удалит этот избыток, перераспределив его вниз по течению и по ширине долины. Таким образом, с физической точки зрения река достаточно легко справляется со всем объемом поступающего рыхлого материала. В разрабатываемой вширь долине на месте «срезаемых» под общий (ранее заданный) уровень скальных пород формируется бронирующий коренное ложе слой аллювия. Следовательно, река постоянно изымает для этого некоторую долю переносимых руслоформирующих наносов, так что, строго говоря, их поступление превышает транспортирующую способность потока.

Боковая эрозия, по близкой аналогии с глубинной, сходит на нет тогда, когда река «раздвигает» борта долины настолько, что практически перестает с ними соприкасаться. Динамическое равновесие достигается на неопределенно длительный срок, в зависимости от общего тектонического режима территории и интенсивности локальных подвижек. При всей универсальности данной схемы именно на этом этапе обретают отчетливое морфологическое выражение «запроектированные» ранее, но пока еще малозаметные различия.

В породах щебнистого типа река переходит к расширению долины, сохранив значительный продольный уклон и быстрое течение. Она интенсивно подрезает склоны, и с них большими массами поступают продукты выветривания, в основном крупности руслоформирующих наносов. Местами это вызывает существенную перегруженность потока, но щебень, благодаря своей подвижности и высокой транспортирующей способности реки, быстро перераспределяется по ширине русла во время паводка и на его спаде откладывается в виде *осередков* — зачаточных островов. Подробно процесс формирования разветвлений (четыре в принципе сходных, хотя и различающихся в деталях механизма) рассмотрен в работе П.Эшмора [10]. Здесь важно подчеркнуть, что перегруженность потока наносами носит ограниченный характер — как во времени, так и в пространстве. Поэтому река, балансируя на грани перехода к направленной аккумуляции, эту грань все же не пересекает. По мере расширения днища долины речной поток все более распластывается (компенсируя уменьшение транспортирующей способности отдельных рукавов), и степень ветвления возрастает, хотя остается небольшой — редко более трех-четырех рукавов и проток в одном поперечном сечении долины.

В породах глыбово-каменного типа река приступает к расширению долины, имея намного меньшую эродирующую способность. Еще контрастнее отличия в интенсивности поступления в русло обломков крупности руслоформирующих наносов (в соответствии с описанными уже особенностями дезинтеграции скального субстрата). Поэтому перенасыщенность ими потока крайне незначительна и река сохраняет единое русло.

Его уклон по мере расширения долины уменьшается из-за увеличения извилистости, соответственно падает и транспортирующая способность, но увеличению перегруженности потока препятствует дальнейшее ослабление боковой эрозии.

В слабо литифицированных породах начальные условия близки к описанным: это небольшие продольные уклоны долины и низкие скорости течения. Склоны подрезаются с меньшей интенсивностью, чем во время глубинной эрозии, и часть образующегося на них щебня распадается на мелкие обломки еще до поступления в русло. Поэтому перегруженность потока руслоформирующими наносами также очень мала. В результате, хотя боковая эрозия развивается с наибольшей скоростью, физических предпосылок для разделения русла на рукава здесь нет, и оно, как и в предыдущем случае, образует все более растянутые в ширину излучины.

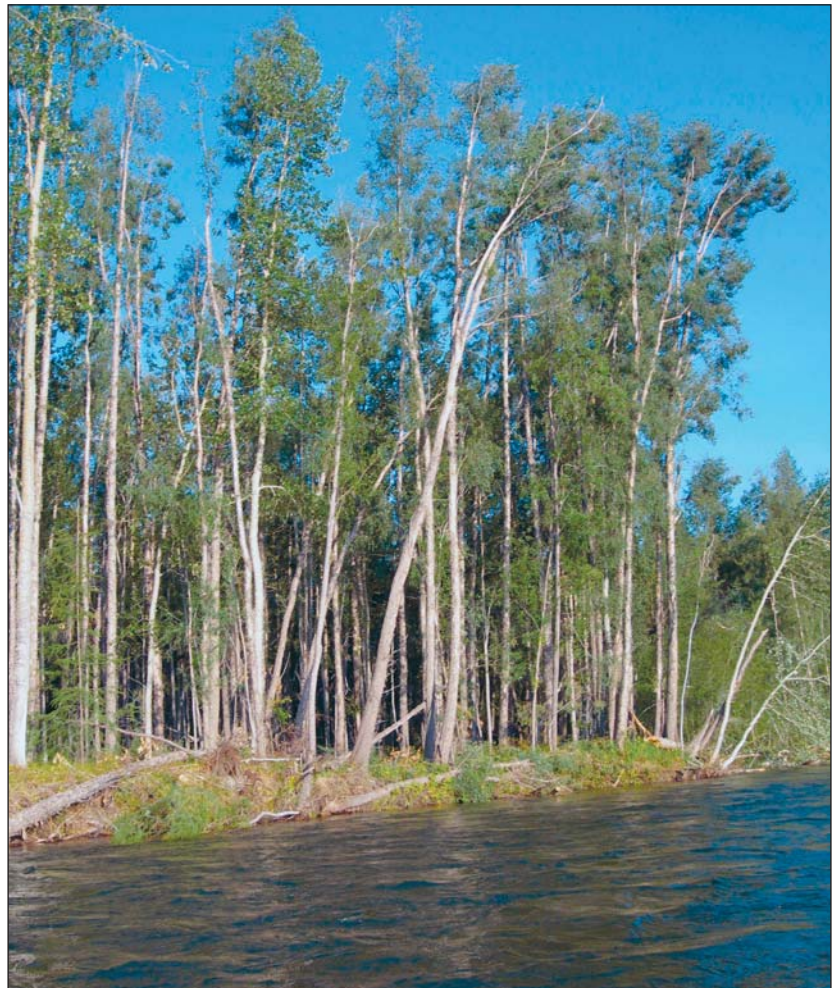
В стадии динамического равновесия взаимодействие потока с коренными породами практически прекращается, и русловые деформации, уже ничем не ограниченные, развиваются «по инерции», наследуя заложенный ранее стереотип и постоянно его воссоздавая.

Многоликое единообразие

Большой части территории Сибири присуща монотонность горно-долинных ландшафтов. Так, название работы известного геоморфолога Ю.Г.Симонова «Долинные мари — региональный тип долин Забайкалья и Дальнего Востока» [11] говорит само за себя. Доминирование в горах Северо-Востока ветвящихся рек обуславливает совершенно иную картину. Ландшафтное разнообразие их долин вызвано в первую очередь особым водно-тепловым режимом пойм (а зачастую и низких террас), в которых, начиная от



Смешанный лес в пойме р.Букэсчан. Такие высокоствольные многоярусные леса доминируют в долинных ландшафтах Северо-Востока.



Тополево-чозениевый лес в долине р.Нерючи.



Парковый лиственничник в долине р.Нелькоба.



Ландшафт рассредоточенного образования наледей в пойме р.Прав.Хета. На заднем плане открывается долина притока с аналогичной «кустарниковой» поймой.

небольших ручьев и заканчивая р.Колыма у пос.Зырянка (водосборные площади от 15—20 до почти 300 тыс. км²), многолетняя мерзлота уступает место обширным таликам [12, 13]. Причинно-следственная связь их формирования с ветвлением рек на рукава, отнюдь не лежащая на поверхности, — тема для отдельного обсуждения.

В большинстве речных долин Северо-Востока ландшафтной доминантой служат высокоствольные многоярусные леса, которым Ю.П.Пармузин, автор ряда интересных книг физико-географической тематики, даже отводит самостоятельную высотную зону [1]. При резко обедненном видовом составе растительности региона (по мнению сибирских ботаников, это попросту «флористический вакуум») пойменные леса выделяются обилием двух уникальных ви-



Слияние рек Ола и Маякан (в левой нижней части снимка).

дов, в остальной Сибири весьма редких: чозении (*Chosenia arbutifolia*) и тополя душистого (*Populus suaveolens*). Они зачастую образуют чисто лиственные древостои, которые распространяются по долинам далеко в тундровую зону, но уже без сопровождения лиственницы (по неясным пока причинам).

Фитоценозы лиственных и смешанных лесов, в целом хорошо известные по научной и популярной литературе [1, 14], далеко не исчерпывают разнообразие долинных ландшафтов. Нередко они представлены редколесными и даже полностью безлесными геосистемами [12]. На талых аккумулятивных террасах это связано с сухостью грунтов из-за их крупнообломочного состава и низкого положения грунтовых вод. Местами галечники с песчаным заполнителем залегают у самой поверхности, и тогда над разреженным напочвенным покровом из лишайников и ягодных кустарничков возвышается лишь низкорослый ерник; такие ландшафты местные оленеводы называют сухими тундрами. Если на галечнике сформировался маломощный песчано-супесчаный слой, то обычно развиваются парковые лиственничники на сплошном ковре белого ягеля, в засушливую погоду хрустящего под ногами не хуже свежавывающего снега.

В поймах наихудшие условия для роста деревьев вызваны образованием наледей. Их относительная площадь — еще один показатель, по которому Северо-Восток намного опережает все прочие территории, причем истинные масштабы образования наледей (а заодно и запасов подземных вод) сильно недооцениваются. Дело в том, что подобные оценки основаны на измерении площадей *наледных полей* (иных способов пока не придумано).



Типичная протока в густо заросшей лесом пойме.



Раннее утро в долине р.Иганджа.

мано). Это участки долин, которые отчетливо выделяются на аэрофотоснимках как светлые пятна — из-за почти полного отсутствия растительности. Окраины полей, где наледи образуются нерегулярно (от года к году) и фрагментарно (по площади), заселены разнообразными кустарниками, иногда с редкими лиственницами, и дешифрируются намного хуже. В большинстве случаев, когда наледи связаны с ограниченными в плане выходами подземных вод, «недоучет» окраин не имеет значения, поскольку на сравниваемых территориях он примерно одинаков. Иное дело Северо-

ро-Восток: в поймах со сквозными таликами связь поверхностных и подземных вод непрерывна вдоль долин, что при значительной мощности подземного потока вызывает рассредоточенное и нерегулярное образование наледей на площадях, в десятки раз превосходящих наледные поляны [12]. В результате в речных бассейнах выделяется специфическая категория «кустарниковых пойма» [14]. По мерзлотно-гидрогеологическому режиму они аналогичны окраинам наледных полей и в отдельные годы буквально залиты льдом, над которым видны лишь верхушки кустарников.

Реки, находящиеся в стадии направленной аккумуляции, еще более увеличивают многоликость ландшафтов. Их своеобразие хорошо видно на примере

контраста интенсивно аккумулялирующей р.Ола, у которой большинство проток отделены друг от друга лишь низкими галечными пляжами, и ее притока р.Маякан, где протоки и рукава напоминают узкие просеки в густом лесу.

Приведенные краткие сведения и иллюстрации могут дать лишь самое общее представление о разнообразии речных долин в горной стране Северо-Востока России. А еще они просто очень красивы, и в них как-то особенно легко дышится. И вода в реках не только ультрапресная (термин), но и ультрачистая — это даже видно на фотографиях. ■

Литература

1. Пармузин Ю.П. Северо-Восток и Камчатка. М., 1967.
2. Михайлов В.М. Горные реки равнин и горы с равнинными реками // Природа. 2010. №5. С.46—53.
3. Михайлов В.М. Морфодинамика русел рек горных стран и литология коренных пород // Геоморфология. 2011. №4. С.11—21.
4. Пиньковский С.И. Типы речных русел Средней и Южной Сибири // Тр. ГГИ. 1962. Вып.94. С.87—114.
5. Пиньковский С.И. Типы речных русел Северо-Востока СССР и полуострова Камчатки // Тр. ГГИ. 1965. Вып.120. С.55—98.
6. Пиньковский С.И. Типы речных русел советского Дальнего Востока (южная половина) // Тр. ГГИ. 1967. Вып.144. С.77—117.
7. Leopold L.B. A View of the River. Cambridge; Massachusetts, 1994.
8. Карташов И.П. Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран (на примере Северо-Востока СССР). М., 1972.
9. Дэвис В.М. Геоморфологические очерки. М., 1962.
10. Ashmore P.E. How do gravel-bed rivers braid? // Canadian Journal of Earth Sciences. 1991. V.28. №3. P.326—341.
11. Симонов Ю.Г. Долинные мари — региональный тип долин Забайкалья и Дальнего Востока // Записки Забайкальского отделения Всесоюзного географического общества. 1964. Вып.14. С.50—57.
12. Михайлов В.М. Пойменные талики Северо-Востока России. Автореф. дисс. ... докт. геогр. наук. Якутск, 2005.
13. Михайлов В.М. Теплые поймы холодных рек // Природа. 2009. №5. С.32—38.
14. Егорова Г.Н. Морфолитосистемы и ландшафтная структура (на примере бассейна реки Омолон). Владивосток, 1983.

Глобальное потепление и аномальная погода начала XXI века

В.А.Семенов

Первое десятилетие XX в. стало самым теплым за время инструментальных наблюдений за глобальной приповерхностной температурой на земном шаре. Ее значения получают, анализируя множество температурных рядов, собранных на метеорологических станциях на суше, а также измеряя температуру поверхности океана (различными методами — с морских судов, автоматических буев, в последние десятилетия — со спутников). Такие данные позволяют составить достоверную картину крупномасштабных температурных аномалий за последние 150 лет.

С начала XX в. глобальная температура выросла примерно на 1°C. Но это увеличение не было равномерным. За так называемым потеплением начала века, достигшим максимума в 40-х годах, последовало некоторое похолодание, вновь сменившееся положительным температурным трендом с 70-х. Потепление ускорилось, и за последние 30 лет XX в. температура выросла почти на 0.7°C. В целом аналогично менялась температура Северного полушария (рис.1) [1], на которое приходится примерно 2/3 площади суши и 90% населения планеты.

По результатам анализов годичных колец деревьев, корал-



Владимир Анатольевич Семенов, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории теории климата Института физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН. Область основных научных интересов — численное моделирование климатических изменений, экстремальные погодные явления, климат Арктики.

лов, характеристик донных отложений, ледяных кернов реконструируются аномалии температуры Северного полушария за последнее тысячелетие. Эти реконструкции (которые, тем не менее, часто становятся предметом горячих споров) показали, что температура последнего десятилетия беспрецедентно высока даже в тысячелетнем масштабе. Я намеренно не касаюсь причин глобального потепления, а также замедления темпов роста температуры в течение последнего десятилетия. Это требует отдельного обсуждения и никак не влияет на тот неоспоримый факт, что начало XXI в. характеризуется самыми высокими глобальными и среднеполушарными температурами за последние как минимум 150 лет. А самый быстрый рост глобальной температуры наблюдался в последние 30 лет XX в.

Казалось бы, повышение глобальной температуры на 1°C — это очень небольшое изменение. Но здесь важно знать следующее. Во-первых, потепление происходит быстрее (примерно вдвое) в высоких широтах Северного полушария. Это явление получило название арктического усиления. Во-вторых, при глобальном потеплении температура над сушей растет быстрее, чем над океаном (приблизительно на 40%). Так, над густонаселенными континентами Северного полушария в средних широтах рост среднегодовой температуры составляет уже не 1°C, а 2—2.5°C. Обе эти особенности главным образом связаны с ростом содержания водяного пара в атмосфере при увеличении температуры (около 7% на 1°C). Водяной пар,

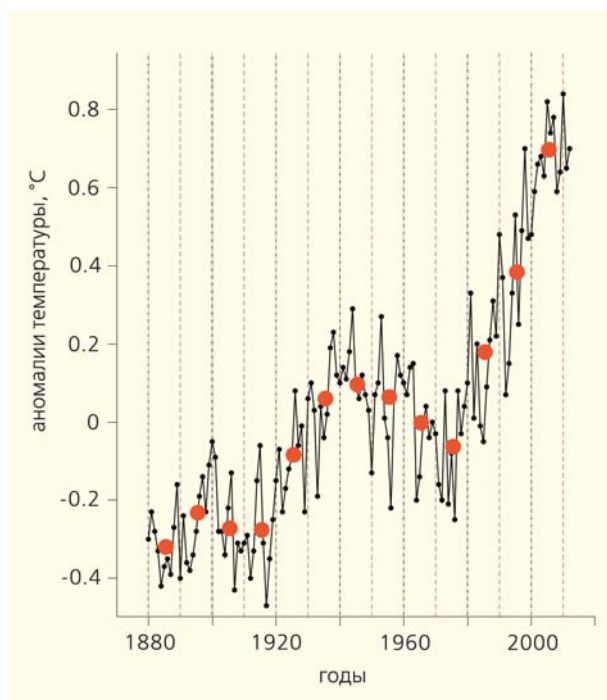


Рис.1. Аномалии среднегодовой (черные кружки) приповерхностной температуры Северного полушария [1]. Большие красные кружки представляют температурные аномалии, осредненные за десятилетия: 1881—1890, 1891—1900...2001—2010 гг.

основным источником которого служит испарение с поверхности океана, переносится из низких широт в высокие и с океана на сушу, где, конденсируясь, приводит к дополнительному потеплению. В-третьих — и это, возможно, самое главное, — даже небольшие вариации глобальной температуры приводят к значительным изменениям циркуляции атмосферы и океана, ответственной за перенос тепла из низких широт в высокие. Механизмы таких изменений, как правило, сложны; в настоящее время они стали предметом многочисленных исследований.

Заметнее, чем температура, изменяются другие характеристики земной климатической системы. Например, за последние 30 лет площадь льда летом в Арктике уменьшилась более чем в два раза. В случае потепления еще на 1 °C акватория Северного Ледовитого океана в теплый период года, как ожидается, будет совсем освобождаться ото льда. Тем не менее, даже учитывая эти особенности, региональное увеличение средней (за год или за сезон) температуры воздуха на 0.2—0.5 °C в десятилетие выглядит гомеопатической дозой.

Человек и созданная им инфраструктура гораздо более чувствительны к экстремальным погодным явлениям, чем к изменениям средних климатических параметров. Экстремальные явления часто сопровождаются большим экономическим ущербом, негативными последствиями для экологии,

а порой и многочисленными человеческими жертвами. Связанные, как правило, с динамикой атмосферной циркуляции — циклонами, антициклонами, атмосферными фронтами — погодные аномалии зависят, причем часто нелинейным образом, от множества факторов. Приводит ли глобальное потепление к увеличению вероятности и интенсивности экстремальных погодных явлений? И если приводит, то каков механизм, связывающий глобальные изменения климата и капризы погоды в региональном масштабе? Однозначных ответов на эти вопросы пока еще нет, хотя в некоторых случаях есть основания говорить о возможном увеличении экстремальности погоды из-за потепления. Также интересно и важно, что связь между аномальной погодой и глобальными климатическими изменениями может быть весьма непростой. В данной статье я постараюсь, помимо рассмотрения некоторых общих аспектов, на нескольких примерах проиллюстрировать сложность физических процессов, которые могут приводить к аномалиям погоды на территории России. Следует отметить, что интенсивные исследования в области экстремальных явлений начались лишь 10—15 лет назад. Этому способствовали систематизация глобальных данных наблюдений и развитие климатических моделей. Дополнительной мотивацией к проведению таких исследований в последние годы стал значительный рост числа сообщений о погодных аномалиях.

Действительно, наряду с рекордными значениями глобальной температуры начало XXI в. сопровождалось множеством экстремальных погодных явлений в различных регионах планеты. Многие из этих событий по своей интенсивности стали беспрецедентными за последние несколько столетий. В качестве примеров (они широко освещались в СМИ) можно упомянуть экстремальные осадки над территорией Германии и Чехии в 2002 г., вызвавшие сильные наводнения в Праге и Дрездене (по уровню воды их уже превзошли наводнения мая-июня 2013 г.). Летом 2003 г. температура воздуха в Западной Европе стала рекордно высокой за как минимум 500 предшествующих лет. В 2005 г. над Северной Атлантикой зародилось множество тропических ураганов, в их числе «Катрина», которая привела к катастрофическим событиям в Новом Орлеане. Спустя два года над Западной Европой пронесся разрушительный шторм «Кирилл». В 2009 г. жара и засуха случились в Австралии, в 2011 г. — в Северной Америке. Жителям Центральной России надолго запомнилась летняя жара 2010 г. с сильной засухой и пожарами, также не имеющая аналогов за последние 500 лет [2]. Еще одна интересная особенность последнего десятилетия — ряд аномально холодных зим на севере Евразии, в том числе на европейской территории России. Эти события вызвали волну обсуждений из-за кажущегося противоречия (как будет показано — мнимого) с кон-

цепцией глобального потепления, предсказывающей наибольшее потепление как раз над северными континентами и в зимний период.

Следует разграничивать экстремальные и аномальные события. Замечу, что точного и универсального определения экстремального события в климатологии пока нет. Приведенное ниже — результат консенсуса, к которому удалось прийти широкому кругу специалистов. Оно, с их точки зрения, позволяет наиболее удачно описать широкий спектр различных явлений, считающихся экстремальными [3]. Экстремальное событие — это событие, при котором величина некоторой характеристики климата (или погоды) находится выше (или ниже) определенного порога, лежащего на верхнем (или нижнем) краю диапазона изменений этой характеристики. Когда рассматривается климатическое экстремальное событие, подразумевается, что диапазон изменений данной характеристики включает достаточно большой (как правило, весь доступный) период наблюдений. Согласно такому определению, летняя жара 2010 г. считается экстремальной, поскольку температура превысила все предшествующие средние для летних месяцев максимальные значения (рис.2). Аномальное же явление характеризуется значительным отклонением климатической переменной от среднего значения — нормы, вычисляемой для интересующего нас периода времени. Хорошим примером были холодные зимы XXI в., которые стали аномально холодными на фоне теплых зим предшествующих двух десятилетий (см. рис.2), но при этом обычными, скажем, для периода 1950—1970-х годов.

Некоторые изменения в частоте и интенсивности экстремальных явлений — прямое следствие общего роста температуры. Они ожидаемы

и объяснимы с помощью простых физических и статистических законов и, кроме того, достаточно хорошо воспроизводятся климатическими моделями. Это, например, экстремально высокие ежедневные температуры и их повторяемость. Они растут с потеплением, что вполне ожидаемо при общем сдвиге функции плотности распределения вероятности температурных аномалий. Такие тенденции отмечаются и по данным наблюдений, и по результатам экспериментов с климатическими моделями. Уменьшаются в целом вероятность и величина отрицательных экстремальных температур.

Несколько сложнее и неопределеннее ситуация с ежедневными осадками. Но и здесь есть физическое обоснование и определенное согласие между данными наблюдений и модельными результатами. Как уже упоминалось, при увеличении температуры воздуха растет содержание влаги в атмосфере. Значит, с потеплением следует ожидать более интенсивных дождей. Так в целом и происходит: интенсивность осадков и их экстремальность растут. Во многих регионах все большая часть общего количества осадков за месяц или сезон приходится именно на сильные дожди, при этом вклад слабых уменьшается. Кроме того, увеличение температуры поверхности океана ведет к росту испарения, а оно, в свою очередь, — к повышению среднего количества осадков. Но пространственная структура таких изменений бывает очень сложной. Например, может снижаться общее количество осадков и расти их экстремальность — из-за уменьшения числа дней с осадками (что, в частности, и происходит в субтропических широтах Евразии) [4]. Еще более сложным образом может меняться статистика сухих и влажных периодов [5].

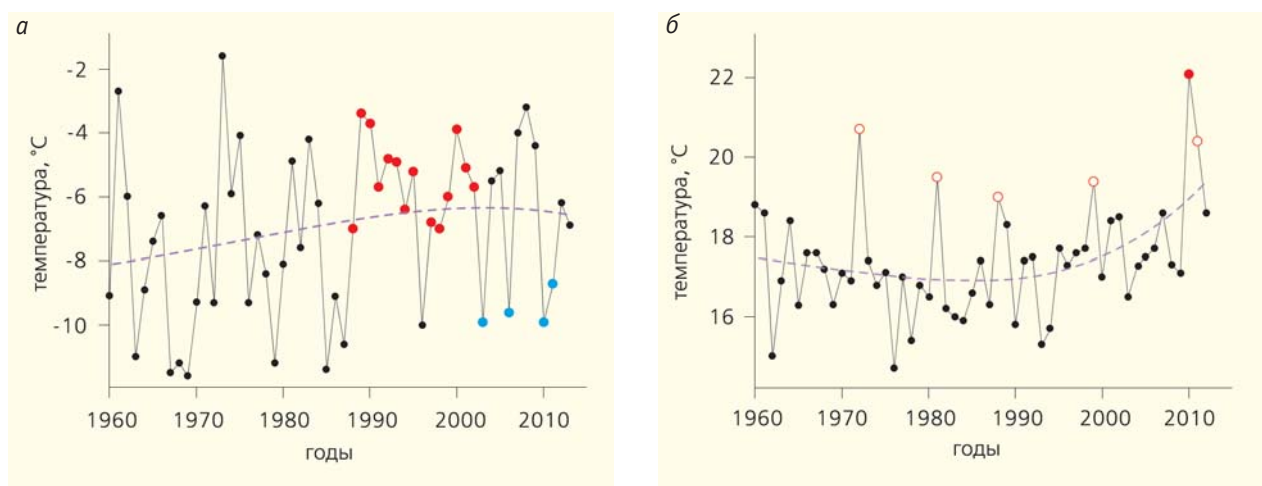


Рис.2. Средние для декабря—февраля (а) и июня—августа (б) температуры в Москве. Красные кружки для зимних температур отмечают период теплых зим 1988—2003 гг., синие — аномально холодные зимы XXI в. Полые красные кружки для летних температур показывают жаркие годы, залитый красный кружок — 2010 г. Прерывистой линией обозначен климатический тренд, представленный полиномом 5-й степени.

Непроста и реакция атмосферной циркуляции на глобальное потепление. В самых общих чертах: уменьшение перепада температур между экватором и полюсом, происходящее при потеплении, должно приводить к снижению интенсивности атмосферных движений. С другой стороны, повышенное содержание влаги в воздухе — скрытой энергии, приводящей к нагреву при выпадении осадков, — может усилить циркуляцию. Еще в начале 1990-х годов, на заре повышенного интереса к проблеме глобального потепления, исследования в нашем институте показали, что потепление может сопровождаться увеличением вероятности формирования долгоживущих погодных аномалий, в том числе блокирующих антициклонов в средних широтах Северного полушария [6, 7]. Это происходит из-за уменьшения здесь скорости зонального потока, которое наблюдается в последние десятилетия. Аналогичные выводы были сделаны и при анализе данных глобальных климатических моделей [8].

Тенденции изменений региональных аномальных погодных режимов, однако, характеризуются большим разнообразием и неопределенностью. Чтобы читатель мог представить себе сложность климатических процессов, вызывающих погодные аномалии, и их связь с глобальным потеплением, я подробно остановлюсь на двух уже упомянутых примерах: холодных зимах последних лет и жаре 2010 г.

Холодные зимы XXI в.

Ряд аномально холодных зим начался с 2003 г. В этот год средняя для зимы температура в Москве была примерно на 3°C ниже нормы и на 5—7°C ниже, чем для большинства зим предшествующего теплого периода 1988—2002 гг. (см. рис.2). Аномалия 2003 г. была воспринята как случайное погодное явление и не вызвала особого интереса у климатологов. Глобальная температура продолжала бить рекорды, арктический лед стремительно таял, и ожидалось, что установившийся в предшествующие 15 лет режим теплых зим продолжится и на этот раз (как он продолжился после аномально холодной зимы 1996 г.). Однако уже через два года (в 2006 г.) зима опять выдалась особенно холодной. Встал вопрос о том, случайны ли подобные события и каковы их механизмы на фоне продолжающегося потепления (которое, согласно модельным оценкам, должно быть наиболее сильным в высоких широтах Северного полушария). Зимой 2006 г. среднемесячные аномалии приповерхностной температуры воздуха достигали -4°C в Европе и -10°C в Центральной Сибири [9]. Эта зима во многих европейских странах стала самой холодной за последние три десятилетия. Аномальные холода и сильные снегопады отмечались также в Восточной Азии. Затем последовали холодные зимы 2010 и 2011 гг. (рис.3). Зимы 2012 и 2013 гг., хоть и не сопровождались значитель-



Рис.3. Аномально холодный январь 2010 г. Москва, утро.

Фото автора.

ной отрицательной аномалией температуры, но запомнились продолжительными (в несколько недель) сильными морозами в западной части Евразии. Как уже говорилось, такие зимы относятся к аномальным событиям. Действительно, в 1960—1980-х годах сходные по суровости зимы считались обычным явлением. Но с 1988 г. все зимы (кроме 1996 г.) были либо аномально теплыми, либо с температурами, находящимися вблизи средних значений. В целом в современный период, как и в 1960—1987 гг., примерно каждая третья зима была аномально холодной (если провести условный порог, скажем, в -8°C для среднезимней температуры в Москве), в то время как в период с 1988 по 2002 г. такая аномалия случилась лишь один раз за 15 лет.

Очевидно, что причиной морозов, как правило, становился блокирующий антициклон в Восточной Европе, препятствующий переносу теплых воздушных масс из Атлантики и выхолаживающий атмосферу. Но почему формировался такой антициклон? И почему он чаще всего располагался именно у южных берегов Баренцева моря? На эти вопросы не было ясных и обоснованных ответов. Модели общей циркуляции атмосферы с использованием граничных условий (температуры поверхности океана и границ морского льда), наблюдавшихся зимой 2006 г., не смогли воспроизвести похожую антициклоническую аномалию. Напрашивался вывод о случайном характере исследуемого феномена. Но некоторые особенности холодной зимы 2006 г. и других аналогичных событий указывали, что именно резкое изменение внешних (по отношению к атмосфере) условий — прежде всего сокращение площади морских льдов — могло стать причиной формирования аномальных температурных режимов.

Действительно, если обратить внимание на изменение площади морского льда в Баренцевом и западной части Карского морей (рис.4), можно заметить, что в 2005 г. она резко сократилась. Относительная площадь льда с 50—60%, характерных для зим 1970—1990-х годов, уменьшилась до современных 40% и менее. Есть еще одна интересная деталь в структуре температурных аномалий: за последнее десятилетие в периоды сильных морозов похолодание над Евразией сопровождалось контрастирующим потеплением (с разницей температур $\sim 15^{\circ}\text{C}$) как раз в регионе Баренцева моря (рис.5). Пример тому — антициклоническая аномалия, расположившаяся к югу от Баренцева моря и ставшая причиной морозов на территории России. Важно отметить, что такое распределение аномалий температур и атмосферного давления было характерно и для других холодных зим современного периода.

При сокращении площади льда растет поток тепла — как явного, так и скрытого (испарение) — с открытой водной поверхности в атмосферу. Из-

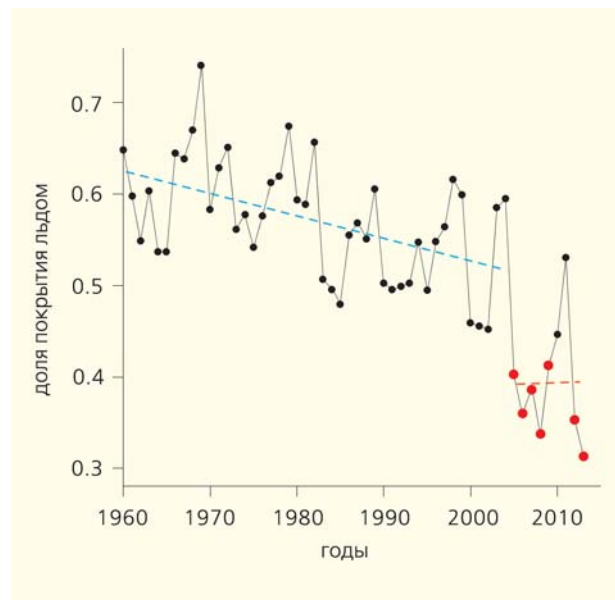


Рис.4. Площадь ледового покрова Баренцева и западной части Карского морей в зимний период по данным наблюдений. Красные кружки — аномально низкие значения с 2005 г. Прерывистая синяя линия — линейный тренд в период 1960—2004 гг., красная — в период 2005—2012 гг.

мерения показывают, что такой поток в течение зимних месяцев может достигать 1000 Вт/м^2 (представьте себе кипящий электрический чайник на каждом квадратном метре поверхности моря)! Следовательно, смена ледового режима в начале XXI в. должна сопровождаться нагревом нижних слоев атмосферы и изменением ее региональной циркуляции.

Почему же тогда эксперименты с атмосферными моделями не смогли воспроизвести характерные условия холодных зим — контраст температурных аномалий между западной частью Евразии и Баренцевым морем и антициклон над его южным побережьем? Возможно, потому, что даже при реалистичном задании границ морского льда потоки тепла, рассчитанные моделью, будут отличаться от наблюдавшихся. Ведь модели, как правило, воспроизводят средние значения параметров атмосферной циркуляции с систематическими ошибками. Поэтому возникла идея изменять площадь покрытия льда в Баренцевом море в модели атмосферы постепенно, проходя весь диапазон возможных состояний, от 100% (полного покрытия льдом) до 0% (свободной поверхности моря). Тогда даже при наличии ошибок в модели (при условии, что они не очень велики) можно оказаться в нужном режиме теплового воздействия на атмосферу. Такие эксперименты были выполнены, и их анализ привел к очень интересным результатам [9].

Оказалось, что реакция атмосферной циркуляции на увеличение потоков тепла с поверхнос-

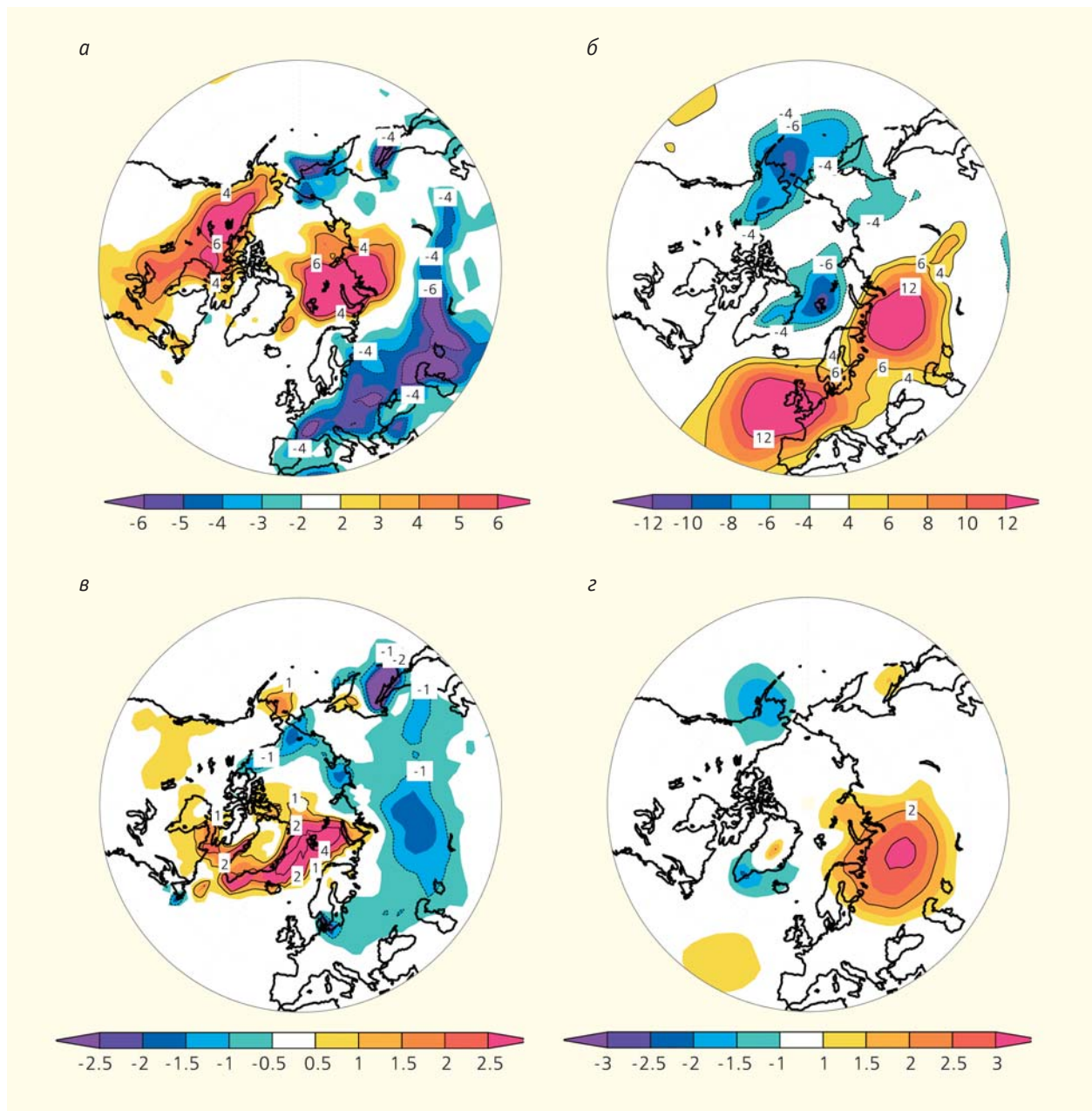


Рис.5. Аномалии: *a, в* — приземной температуры (°C); *б, г* — атмосферного давления (гПа); *a, б* — наблюдавшиеся в феврале 2012 г. (по данным реанализа NCEP/NCAR [9]); *в, г* — полученные в численных экспериментах с моделью общей циркуляции атмосферы при заданной отрицательной аномалии арктического ледяного покрова.

ти Баренцева моря — нелинейная (рис.6). Возможно, именно поэтому многие попытки воспроизвести в модельных экспериментах антициклон, наблюдавшийся во время холодных зим, оказывались неудачными. Климатический режим в моделях просто не попадал в нужный достаточно узкий диапазон изменений интенсивности нагрева, необходимый для формирования региональной антициклонической аномалии в потоке циркуляции. Монотонное уменьшение площади морских льдов сначала приводит к потеплению над об-

ширной областью северной части Евразии, а затем (при сокращении площади льда от 80—60% до 40%) — к относительному похолоданию, которое вновь сменяется потеплением при полном исчезновении морского льда. Такая динамика связана с аномалиями региональной атмосферной циркуляции над Баренцевым морем (см. рис.6). В самом начале сокращения ледового покрова возникает отрицательная (циклоническая) аномалия давления воздуха, а при переходе от 60 к 40% площади покрытия моря льдом давление

растет и формируется антициклон. Он располагается над морем или южнее (см. рис.5) и вызывает похолодание на севере Евразии. Механизм такого отклика региональной циркуляции связан с нелинейным взаимодействием конвекции, поверхностного трения и термического ветра в приграничном слое атмосферы с источником тепла на нижней границе [9].

В реальности площадь ледового покрова (см. рис.4) в начале XXI в. сократилась как раз до ~40%, что в модельных экспериментах сопровождается появлением антициклонической аномалии и относительным понижением температуры. Оно, впрочем, относительно небольшое (примерно 1°C), но при этом вероятность очень сильных отрицательных температурных аномалий (до -7°C) существенно возросла (более чем в три раза).

Описанные выше эксперименты были идеализированными, поскольку аномалии площади льда задавались путем равномерного изменения его концентрации во всех модельных ячейках, покрывающих регион Баренцева моря. А модели атмосферы с реалистичными аномалиями ледяного покрова, как уже отмечалось, не воспроизводили эффект похолодания. В нашем институте мы вместе с коллегами из Института морских исследований в Киле (Германия) продолжили работу в этом направлении и все-таки смогли воспроизвести такой эффект в одном из экспериментов с уменьшением площади льда согласно данным наблюдений [11, 12]. Модельные аномалии давления и температуры стали следствием уменьшения площади ледяного покрова (главным образом в Баренцевом море), заданного по результатам реальных наблюдений (см. рис.5). Это и антициклоническая аномалия к югу от Баренцева моря, и обширное похолодание на территории Евразии. Нелинейная зависимость вероятности наступления холодных зим от площади льда была также обнаружена и в экспериментах с глобальными климатическими моделями (включающими модели общей циркуляции океана, атмосферы и морского льда) при разных сценариях антропогенного воздействия на климат [13].

Таким образом, результаты исследований говорят о том, что глобальное потепление, сопровождающееся таянием морских льдов в Арктике, в начале XXI в. может приводить к более частым продолжительным периодам сильных морозов, в том числе на европейской территории России. Означает ли это, что зимы в России будут все более и более морозными? Как уже показано (см. рис.6), резкий переход к режиму с относительным похолоданием вновь сменяется потеплением (и циклонической аномалией) при дальнейшем уменьшении площади льда. Значит, при сокращении площади льда в Баренцевом море до 20% и менее следует ожидать достаточно резкого перехода к режиму положительных аномалий температур — и снова к аномально теплым зимам.

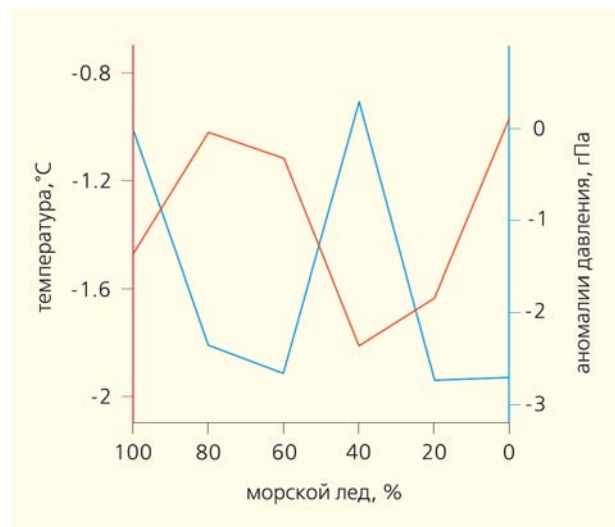


Рис.6. Зависимость изменений температуры воздуха в феврале в Восточной Европе (красная кривая) и аномалии давления воздуха над Баренцевым морем (синяя кривая) от концентрации морского льда в Баренцевом и западной части Карского морей в экспериментах с моделью общей циркуляции атмосферы.

Сколь же долго продлится современный режим с площадью ледяного покрова 40—30%? Некоторые модельные оценки показывают, что уже через 10—15 лет граница распространения льда в Баренцевом море зимой может достичь его восточных берегов (Новой Земли). С другой стороны, океанографические данные свидетельствуют об аномально сильном переносе теплой атлантической воды в Арктику в начале 2000-х годов. Это и могло привести к резкому изменению ледового режима (см. рис.4). Пик поступления атлантических вод в последние годы сошел на нет, и это, возможно, снова приведет к росту площади льда. Кроме того, существует так называемая Атлантическая долгопериодная осцилляция — колебание переноса океанического тепла в высокие широты с периодичностью в 60—70 лет. Эта осцилляция находится сейчас в положительной фазе, а в ближайшее десятилетие должен начаться переход к отрицательной, что также может привести к замедлению таяния льда или даже к росту его площади. Все эти изменения к тому же происходят на фоне парникового эффекта, приводящего к общему нагреву водных масс.

Таким образом, налицо существенная неопределенность в оценках даже направленности изменений будущих ледовых условий в Арктике. А ведь именно современные естественные (не связанные с внешним воздействием) колебания климата в масштабе десятилетий особенно важны. Они могут приводить к тенденциям изменений климатических параметров, противоположным тем, которые вызывает усиливающийся парниковый эффект.

Количественные оценки относительного вклада как внешних факторов, так и внутренней изменчивости до сих пор находятся в очень широком диапазоне. Но в целом в последние 30–40 лет они сопоставимы [14], а значит современный режим может продлиться еще одно-два десятилетия.

Как бы ни менялся климат в ближайшие годы, природные результаты показали, что ледовитость Баренцева моря в зимний период — важный фактор, определяющий аномалии погоды на территории России. В том числе довольно неожиданным образом: путем формирования антициклонической аномалии и морозов над регионами Евразии в результате таяния льда.

Здесь нужно отметить, что особое влияние Баренцева моря на циркуляционные режимы атмосферы было отмечено еще как минимум с 1960-х годов советскими метеорологами. И еще одна интересная деталь. К сожалению, отсутствуют достоверные сеточные данные о состоянии арктического ледяного покрова в середине XX в., которые позволили бы провести модельные исследования. Но оценки, основанные на различных эмпирических данных (а также использование специальных моделей), показали, что в 1940-х годах в зимний период льда было примерно так же мало, как и сегодня. И, возможно, именно этот фактор стал причиной аномально холодных зим 1941/42 и 1942/43 гг., знаменитых в историческом контексте великими победами в битвах под Москвой и Сталинградом.

Аномальная жара 2010 г.

Летняя жара в июле и августе 2010 г. в европейской части России — хрестоматийный пример экстремального явления [15]. В этот период среднемесячная температура в огромном регионе, по площади превосходящем Германию, превышала норму более чем на 6°C и стала рекордной как минимум за последние 100 лет (см. рис.2). Продолжительный период высоких температур и отсутствие осадков привели к засухе и, как следствие, к лесным и торфяным пожарам. Москва погрузилась в душливый смог. Максимум загрязнения атмосферы пришелся на конец июля — начало августа. В Московском регионе концентрация аэрозольных частиц размером меньше 10 мкм (особенно опасных для здоровья) превышала предельно допустимую в пять раз. Смертность населения в Москве и Поволжье возросла в полтора раза. Причиной экстремальной жары стал блокирующий антициклон, «зависший» над Восточной Европой на целых шесть недель. Температурные аномалии в июле 2010 г. сопровождалась атмосферным давлением, превысившим 6 гПа (рис.7).

Причины жары 2010 г. в России (а также 2003 г. в Европе) невозможно объяснить простым смещением функции распределения температур-

ных аномалий вследствие общего потепления. Вероятность такого события оказывается очень малой (раз в несколько тысяч лет). Для ее увеличения должна измениться структура функции распределения температуры. И такие изменения, сопровождающиеся не только сдвигом среднего значения, но и увеличением изменчивости, действительно происходят в модельных экспериментах при глобальном потеплении [16]. Но эффект от них сравнительно невелик, поэтому вопрос о связи аномальной жары с современными изменениями климата остается открытым. Как и в случае с холодными зимами, попытки воспроизвести жару 2010 г. в экспериментах с использованием наблюдавшихся тем летом значений температуры поверхности океана и границ морского льда оказались неудачными [17]. Это указывало на случайный характер такого события, причина которого могла стать стохастическая динамика атмосферы. Возможно, это связано с несовершенством моделей. Известно, например, что блокирующие антициклоны воспроизводятся ими до сих пор недостаточно реалистично. В глобальной климатической системе в 2010 г. отмечались рекордные аномалии температуры поверхностных вод Атлантического и Индийского океанов и сильное явление Ла-Нинья в экваториальной части Тихого океана. Предполагается, что все это взаимосвязано с системой муссонной циркуляции и аномальной генерацией атмосферных волн. Предложенные механизмы таких связей, однако, пока остаются весьма общими и скорее концептуальными [18].

Существенную особенность формирования аномальной жары 2010 г. выявили исследования, проведенные в Институте вычислительной математики РАН с использованием разработанной там глобальной климатической модели. Эксперименты показали, что такие экстремально высокие температуры могли быть достигнуты только при дополнительной адвекции теплого и сухого воздуха с востока и юго-востока. Таким образом, образованию антициклона должно было предшествовать снижение влажности почвы в Поволжье и южном Предуралье. Это как раз и наблюдалось в 2010 г. и было воспроизведено в модельных экспериментах. Отрицательная аномалия влажности почвы в модели общей циркуляции атмосферы создавалась искусственно. Это увеличивало температуру при формировании блокирующего антициклона более чем на 3°C по сравнению с экспериментом, где поддерживалась среднеклиматическая влажность [19]. Таким механизмом можно объяснить экстремально высокие температуры летом 2010 г.

В ответ на глобальное потепление XXI в. климатические модели предсказывают уменьшение количества осадков в летний период [4] и, соответственно, снижение влажности почвы. Следовательно, стоит ожидать увеличения вероятности

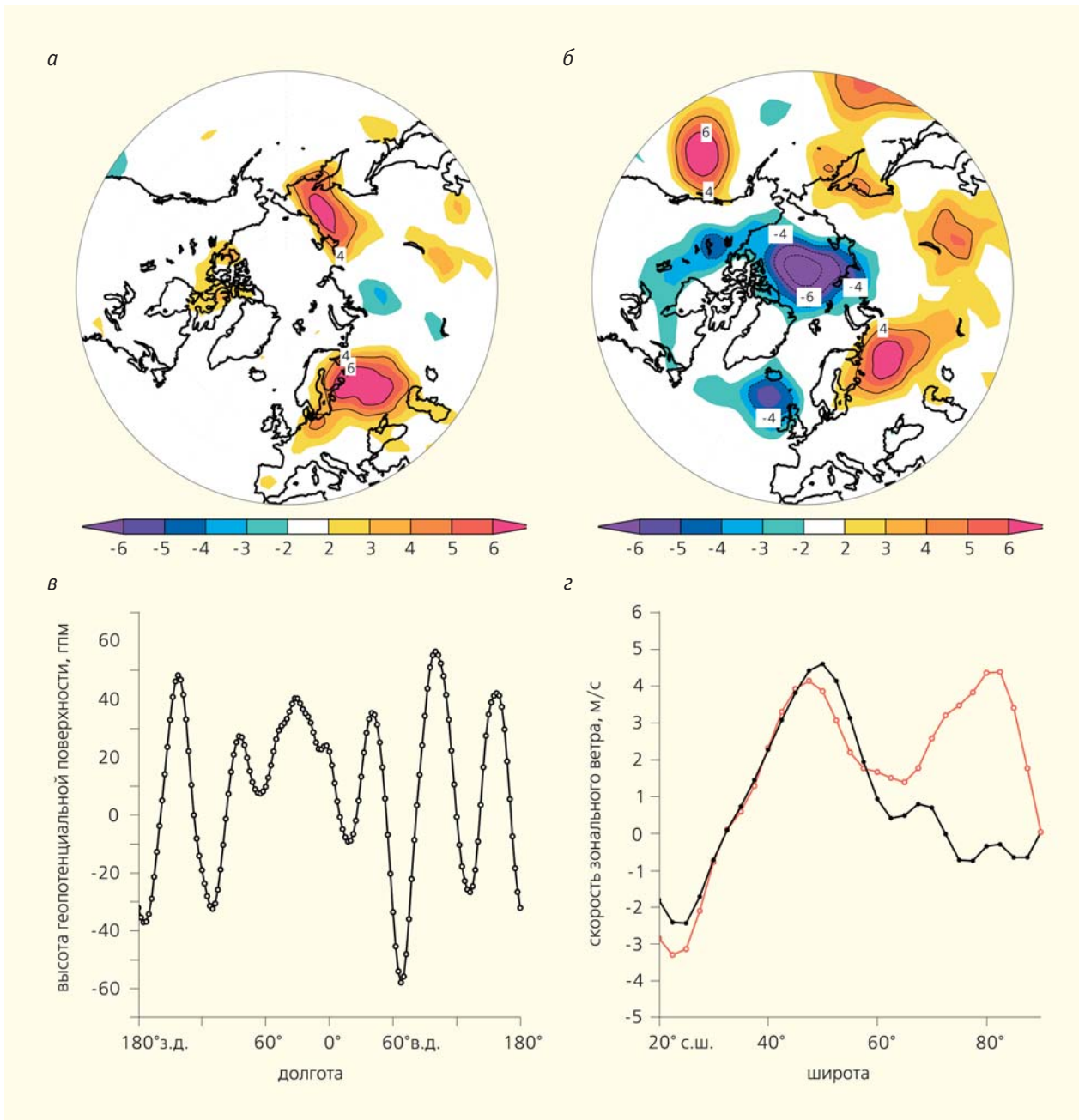


Рис.7. Наблюдавшиеся в июле 2010 г. аномалии: а — приземной температуры (°С), б — атмосферного давления (гПа), в — высоты геопотенциальной поверхности на уровне 300 гПа в широтном поясе 35—45°с.ш., г — осредненных для широтного круга значений зонального ветра на уровне 850 гПа (красная кривая показывает июльские значения для периода 1948—2012 гг.) по данным реанализа NCEP/NCAR [9].

одновременного возникновения блокирующего антициклона в восточноевропейском регионе и засухи в Поволжье и южном Предуралье.

Был ли случаен, как следует из результатов модельных экспериментов, московский антициклон в 2010 г, равно как и антициклон над Западной Европой во время европейской волны тепла в 2003 г.? Может оказаться, что нет, если внимательно проанализировать не только региональ-

ные, но и глобальные особенности погоды во время формирования долгоживущих блокирующих аномалий атмосферной циркуляции в последнее время. Как показали недавние работы сотрудников Потсдамского института исследования климатических воздействий (Германия), образование долгоживущих аномалий погоды (в том числе летней жары 2003 и 2010 гг.) может быть связано с особенностями волновой динамики атмосфер-

ной циркуляции, обусловленными недавними климатическими изменениями [20]. Расскажу об этом интересном механизме подробнее.

Известно, что в атмосфере могут образовываться крупномасштабные волновые движения — волны Россби—Блиновой, названные в честь шведского метеоролога К.-Г.Россби и советского ученого Е.Н.Блиновой, открывших их независимо друг от друга. Такие волны также называют планетарными. Необходимое условие их генерации в атмосфере Земли — изменение величины силы Кориолиса с широтой. Волны Россби—Блиновой приводят к возмущению зонального потока в средних широтах и образованию характерной более или менее симметричной картины меандров линий тока атмосферной циркуляции, а также чередующихся максимумов и минимумов различных метеорологических параметров вдоль широтного круга. Существуют квазистационарные планетарные волны, неподвижные относительно земной поверхности. Они генерируются главным образом вследствие орографических (изменения высоты поверхности) и термических (нагрева, охлаждения) возмущений атмосферы, обусловленных широтным распределением океанов и материков. Амплитуда таких волн уменьшается с ростом зонального волнового числа (здесь определяемого как количество волн вдоль широтного круга). Квазистационарные волны с волновым числом 6—8 и пространственным масштабом 2000—3000 км (сравнимым с размером синоптических вихрей — циклонов и антициклонов) очень слабы и обычно не оказывают существенного влияния на формирование погодных аномалий.

Планетарные волны в средних широтах также генерируются синоптическими аномалиями циркуляции. Такие волны называются свободными синоптическими и имеют волновые числа 6 и более, что характерно для движений синоптического масштаба. Эти волны тоже, как правило, имеют небольшую амплитуду и быстро затухают. Ограничивать распространение и сохранять энергию волн способен так называемый волновой канал (или волновод). При его наличии синоптические волны затухают значительно медленнее и распространяются вдоль широтного круга. И в этом случае они могут вступить в резонанс с квазистационарными планетарными волнами с одинаковыми волновыми числами. Это приводит к резкому усилению последних и сопровождается как раз такими явлениями, как летние антициклоны 2003 и 2010 гг. Именно сильные стационарные меридиональные волны, охватывавшие все Северное полушарие, наблюдались в июле 2010 г. Лучше всего такие волны иллюстрируются данными верхней тропосферы — например, аномалиями высоты геопотенциальной поверхности на уровне 300 гПа, представляющими волну с зональным волновым числом 6 (см. рис.7). Волновая структура также выражена и в аномалиях ат-

мосферного давления (см. рис.6) и температуры (что менее заметно).

Волновой канал образуется при бимодальном распределении зональной скорости ветра в атмосфере, которая обычно имеет одногорбое распределение с максимумом вблизи 45°с.ш. (см. рис.7). В период жары 2003 и 2010 гг., а также во время нескольких других подобных явлений, распределение зонального ветра имело еще один максимум в высоких широтах [20]. Это и обусловило появление волновода в средних широтах и волновой резонанс с формированием долгоживущих аномалий атмосферной циркуляции. Образование бимодальной структуры профиля зонального ветра может происходить при уменьшении меридионального температурного градиента, что связано с арктическим усилением глобального потепления.

Таким образом, два фактора, связанные с глобальным потеплением, могли повлиять на возникновение аномальной жары 2010 г. Достижению рекордных температурных отклонений способствовала отрицательная аномалия влажности почвы, вероятность чего должна увеличиваться при потеплении. А вызвать резонанс планетарных волн и долгоживущий блокирующий антициклон могла бимодальная структура зонального потока в Северном полушарии, формированию которой способствует ускоренное потепление в Арктике.

Два рассмотренных выше примера — аномальных зимних морозов последнего десятилетия и экстремальной летней жары 2010 г. — показывают, насколько непростой может быть связь глобального потепления с погодными аномалиями. Следует отметить, что помимо рассмотренных механизмов существует большое количество других факторов, также оказывающих влияние на атмосферную циркуляцию над территорией России. В их числе явление Эль Ниньо — Южная Осцилляция, аномалии муссонной циркуляции (связанные с ростом температуры поверхности океана в последние годы), резкое таяние льда и смещение океанических фронтов. Исследование механизма формирования того или иного погодного экстремального явления требует многостороннего анализа с использованием как численного моделирования, так и эмпирических данных. Существенный прогресс в развитии атмосферных моделей, рост производительности суперкомпьютеров, появление новых, более полных архивов данных наблюдений позволяют надеяться не только на лучшее понимание процессов, приводящих к аномальной погоде, но и на улучшение ее прогнозирования.

В заключение вернусь к проблеме динамики глобальных климатических изменений. В последнее время темпы потепления замедлились, но что стало причиной такого замедления? Это случайная флуктуация климата или проявление естественной долгопериодной изменчивости (связанной, например, с процессами в Северной Атлан-

тике), влияние которой на глобальный климат, возможно, существенно недооценено [14]? Не слишком ли, с другой стороны, быстро растет температура в климатических моделях в ответ на увеличение концентрации парниковых газов в ат-

мосфере [21]? Вызвано ли оно антропогенными факторами или причина — в потеплении верхних слоев океана [22]? Эти вопросы до сих пор остаются открытыми, а научная дискуссия вокруг них только разгорается. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-05-00579), Минобрнауки (мегагранты 11.G34.31.0007, 14.V25.31.0026) и Российской академии наук (ГК 74-ОК/11-4, программы ПРАН 4, 31).

Литература

1. Hansen J., Ruedy R., Glascoe J., Sato M. GISS analysis of surface temperature change // *Journal of Geophysical Research*. 1999. V.104. №D24. P.30997—31022.
2. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J. et al. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe // *Science*. 2011. V.332. P.220—224.
3. IPCC Special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation / Eds. C.B.Field, V.Barros, T.F.Stocker et al. Cambridge; N.Y., 2012.
4. Semenov V.A., Bengtsson L. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // *Climate Dynamics*. 2002. V.19. P.123—140.
5. Zolina O., Simmer C., Belyaev K. et al. Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years // *Journal of Climate*. 2013. V.26. P.2022—2047.
6. Курганский М.В. Введение в крупномасштабную динамику атмосферы. СПб., 1993.
7. Мохов И.И., Петухов В.К. Блокнги и их тенденции изменения // *Докл. АН*. 1997. Т.337. №5. С.687—689.
8. Мохов И.И. Действие как интегральная характеристика климатических структур: оценки для атмосферных блокнгов // *Докл. АН*. 2006. Т.409. №3. С.403—406.
9. Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2010. V.115. P.D21111 (DOI:10.1029/2009jd013568).
10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. of the American Meteorological Soc.* 1996. V.77. P.437—470.
11. Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т.48. №4. С.403—421.
12. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Тенденции климатических изменений в высоких широтах Северного полушария: Диагностика и моделирование // *Лед и Снег*. 2013. №2 (122). С.53—62.
13. Yang S., Christensen J.H. Arctic sea ice reduction and European cold winters in CMIP5 climate change experiments // *Geophysical Research Letters*. 2012. V.39. P.L20707 (DOI:10.1029/2012gl053338).
14. Semenov V.A., Latif M., Dommenges D. et al. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern hemisphere surface air temperature // *Journal of Climate*. 2010. V.23. P.5668—5677.
15. Мохов И.И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т.47. №6. С.1—8.
16. Schar C., Vidale P.L., Luthi D. et al. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves // *Nature*. 2004. V.427. P.332—336.
17. Dole R., Hoerling M., Perlwitz J. et al. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? // *Geophysical Research Letters*. 2011. V.38. P.L06702 (DOI:10.1029/2010gl046582).
18. Trenberth K.E., Fasullo J.T. Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012. V.117. P.D17103 (DOI:10.1029/2012jd018020).
19. Володин Е.М. О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры // *Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета РАН «Исследования по теории климата Земли»*. М., 2011. С.48—57.
20. Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J. Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern hemisphere weather extremes // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012. V.110. P.5336—5341.
21. Lindsen R.S., Choi Y.-S. On the determination of climate feedbacks from ERBE data // *Geophysical Research Letters*. 2009. V.36. P.L16705 (DOI:10.1029/2009GL039628).
22. Humlum O., Stordahl K., Solheim J.E. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature // *Global and Planetary Change*. 2013. V.100. P.51—69.

Жизнь соленосных недр Мертвого моря и его аналогов

Г.А.Беленицкая,

доктор геолого-минералогических наук

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им.А.П.Карпинского
Санкт-Петербург

Две предыдущие статьи из цикла «Мертвое море: соли, рассолы, мифы» были посвящены строению и происхождению соленосной структуры этого моря-озера [1, 2]. В них показано, что определяющую роль в «жизни» его соленосных недр играли (и играют поныне) восходящие разгрузки погребенных углеводородно-рассольно-соляных масс. На современном этапе доминирующая роль принадлежит рассолам. Тектоническая и флюидодинамическая активность неизменно служила (и служит) регулятором интенсивности разгрузки. Этот вывод позволяет несколько иначе, чем принято, взглянуть на некоторые проявления жизни соленосных недр и на их причины. И прежде всего — на современные и бывшие колебания уровня рассолов Мертвого моря, в том числе на наблюдаемое в наши дни его катастрофическое снижение.

Но сначала посмотрим на другие солянокупольные бассейны мира.

Природные аналоги Мертвого моря

Правильно выбранная аналогия нередко оказывается эффективным научным аргументом.

Х.Соколин

«Архитектурный образ» типичного солянокупольного бассейна наглядно нарисовал А.К.Певнев: «Если в солянокупольной области мысленно удалить все осадочные породы, покрывающие соленосную толщу, то взгляду откроется удивительная картина смотрящих в небо разновысоких соляных колонн, получивших название соляных штоков... Высоты соляных массивов и штоков... могут быть исполинскими — до десятка километров» [3, с.6], а площадь их сечения (добавим) — до многих сотен квадратных километров. О некото-

рых «архитектурных» особенностях таких бассейнов я уже рассказывала в «Природе» [4, рис.3—6].

Соленосная структура Мертвого моря подобна своеобразной тектонически ограниченной вырезке одного гигантского штока, сверху осложненного более мелкими поднятиями и прогибами [1, рис.2]. Подобна она таким штокам даже по площади (500—1000 км²) и количеству соляных осложнений — от двух до пяти.

Удобными объектами для более детальных сопоставлений могут служить галопары — сочетания отрицательных и положительных соляных форм, которые осложняют основные соляные массивы. В нашем случае это прежде всего пара: рассольный водоем Мертвого моря — диапир горы Седом. Их аналоги известны в Прикаспийском, Мексиканском, Персидском, Североафриканском бассейнах, в Австралии (бассейны Амадиес, Эйр, Торренс), в Андах (в Восточном Перу, Атакаме, на Альтиплано-Пунийском плато) и во многих других соленосных регионах мира (рис.1). Все чаще гало-



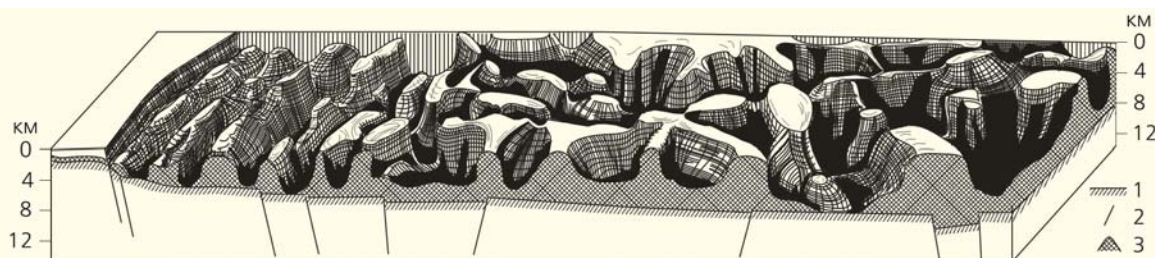
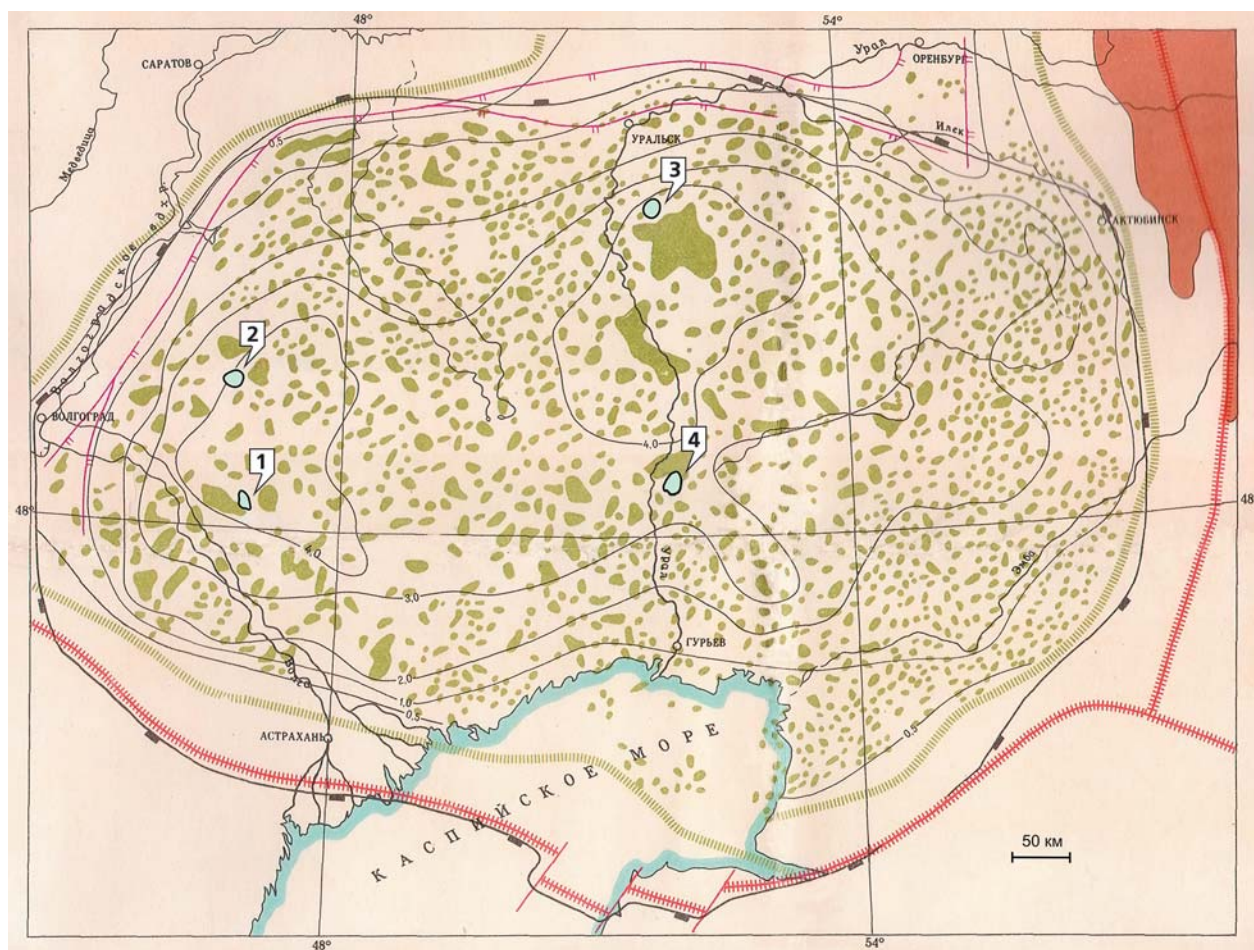


Рис.1. Рассольные наддиапировые озера — гидрогеохимические аналоги Мертвого моря. Вверху — карта распространения соляных куполов Прикаспийского соленосного бассейна (озера: 1 — Эльтон; 2 — Баскунчак; 3 — Челкар; 4 — Индер) [5] и блок-диаграмма соляных гигантов [4, по И.М.Бовару]; внизу — озера Эльтон (а), Баскунчак (б), Ассаль (в) [flickr.com].

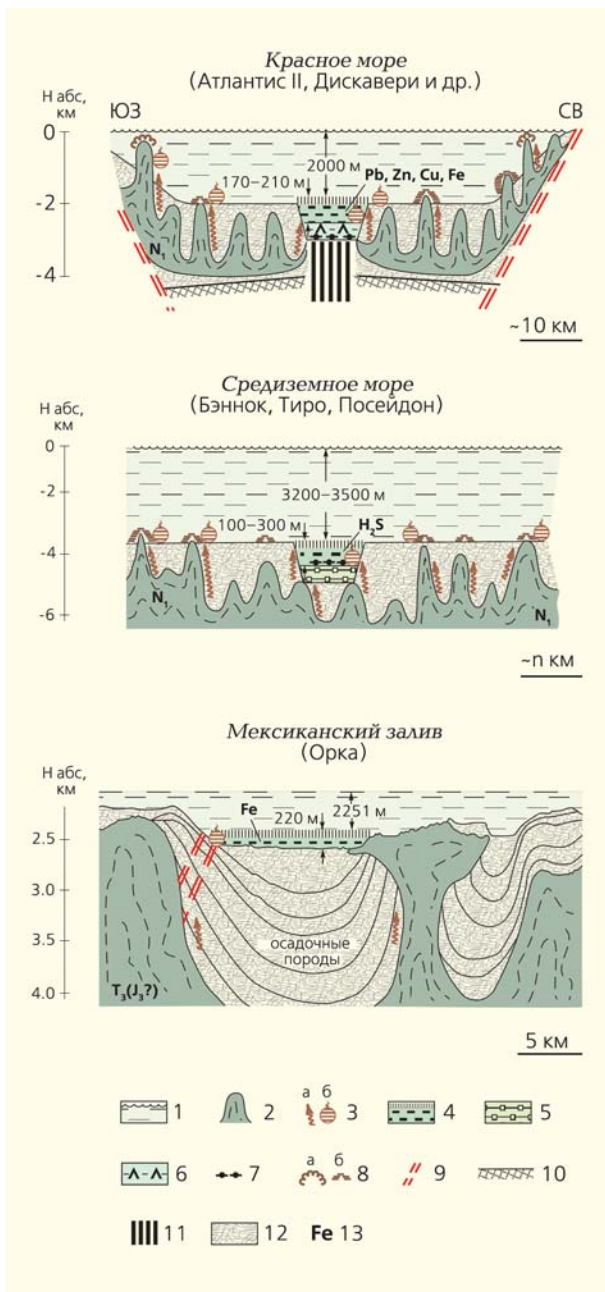


Рис.2. Модели глубоководных «галопар» — известных рассольных котловин (в скобках даны их названия) и соляных поднятий-диапиров. Составила Беленицкая. 1 — акватории; 2 — соляные диапиры; 3 — восходящие потоки углеводородно-рассольных флюидов (а) и очаги их разгрузки (б); 4 — глубоководные рассольные водоемы (числа рядом — их глубина); 5—8 — осадки и образования, сопряженные с активной разгрузкой углеводородно-рассольно-соляных масс: 5 — галититовые, 6 — сульфатно-кальциевые (гипсовые, ангидритовые), 7 — углеродистые, 8 — наддиапировые морские рифогенные (а) и придонные биогермные (б); 9 — тектонические нарушения; 10, 11 — кора континентальная (10) и океаническая (11); 12 — над- и межсолевые осадочные отложения; 13 — специализация металлоносных рассолов и осадков.

пары обнаруживаются и в субаквальных условиях, в том числе глубоководных, под толщами морских вод, мощностью более 2—3 км (рис.2). Так, в Мексиканском заливе тело аллохтонного (чужеродного) соляного покрова осложнено многочисленными штокообразными поднятиями, которые разделены крупными прогибами — мини-бассейнами. В одном из них на отметке 2250 м находится знаменитое подводное рассольное «озеро» Орка глубиной до 220 м [6, рис.6]. В Средиземном море в сходной ситуации на еще более значительных глубинах (3200—3550 м) также обнаружены рассольные впадины (до 100—300 м) — Тиро, Бэннок, Посейдон, Урания, Аталант и др.

Галопары почти всегда связаны с движущимися соляными массами и представляют собой близповерхностные фронтальные осложнения восходящих солянокупольных массивов, растекающихся аллохтонных покровов (как в Мексиканском и Средиземноморском бассейнах) или гигантских перетоков солей, которые возникают на стыке двух тектонических структур (что характерно для Мертвого моря и Данакильской впадины).

Повсеместно, как и в грабене Мертвого моря, галопары бывают наследниками пар-предшественников: соляных палеоподнятий — погребенных палеопрогибов, при этом часто более масштабных и контрастных, чем современные.

Ярко выражены и многие другие черты подобия. Однотипны, например, гидрохимические показатели рассолов (их макро- и микрокомпонентный состав, Cl/Vr коэффициент и др.) [2, рис.8], а также комплексы возникающих из них минеральных новообразований. Среди них помимо наиболее обычных соляных минералов (галита, гипса, ангидрита, доломита и др.) широко распространены сера самородная, бораты, производные углеводородов, сероводород.

Особенно отчетливо черты сходства с соленосной системой Мертвого моря проявлены на соляных куполах-гигантах Прикаспийской впадины — Эльтоне, Индере, Челкаре, Азгире, Матенходже (см. рис.1). Баскунчакская структура стала одним из первых в России полигонов по изучению современных движений соленосных недр [3]. Озеро Баскунчак, как и Мертвое море, — место и живительное, и мистическое. Здесь те же рассолы и целебная грязь, кристально чистый воздух, адская жара и миражи, красивейшие соляные друзы, корки, сталактиты и причудливые обрастания любых предметов (рис.3). Недаром чаще других Баскунчак именуют российским Мертвым морем.

Наиболее значимую «необычность» Мертвого моря среди подобных соленосных объектов составляет его локализация в небольшой (по геологическим меркам) котловине с ярко выраженной тектонической природой и рекордно низкий уровень поверхности рассолов и дна водоема. За все это во многом отвечает тектоническое своеобразие структуры Мертвого моря — возникнове-

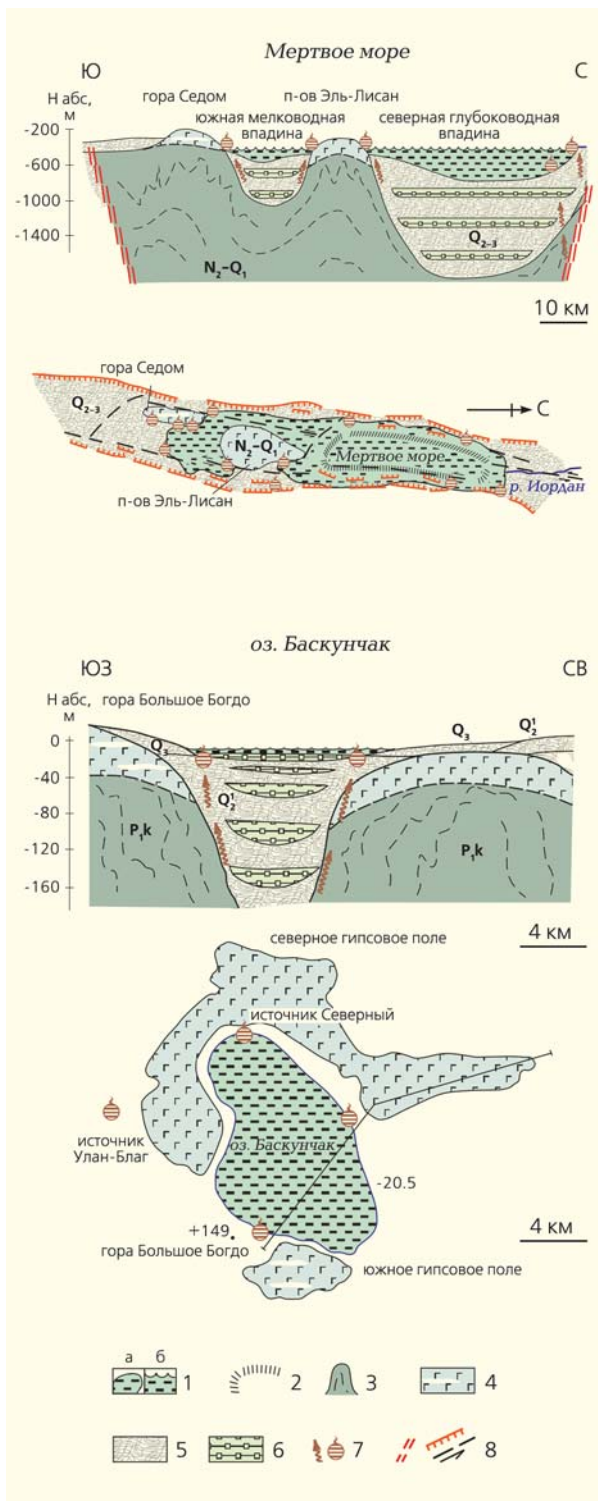


Рис.3. Сопоставление галопар — соляных гор-диапиров и наддиапировых рассольных озер Мертвого моря и Баскунчак (Прикаспийский соленосный бассейн). Составила Беленицкая. Схематические план и профиль Мертвого моря [2] и оз. Баскунчак [3, с изменениями и дополнениями]. 1 — высококонцентрированные рассолы современных озер на планах (а) и на разрезах (б); 2 — контуры глубоководной впадины Мертвого моря (на плане); 3 — соляные породы диапиров; 4 — кепроки (соли, гипсы, фрагменты несоляных пород) в кровле диапиров с карстовыми системами; 5 — четвертичные существенно терригенные озерные и речные отложения (в разной мере соле- и гипсоносные); 6 — соляные четвертичные осадки (отложения рассольных палеозер); 7 — восходящие потоки рассолов и очаги их разгрузки; 8 — крупные тектонические нарушения. На фото — Мертвое море и гора Седом (вверху) и оз. Баскунчак и гора Богдо (внизу) [flickr.com].

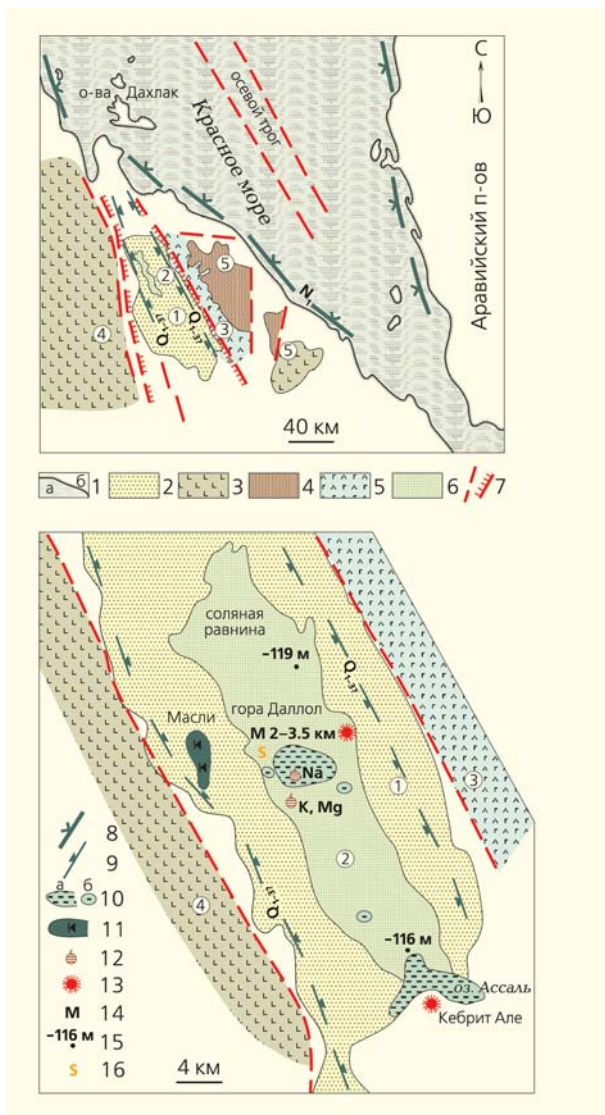


Рис.4. Тектоно-фациальные схемы Данакильского соленосного бассейна. Составила Беленицкая [7, 8, с дополнениями]. Вверху — область сочленения Данакильского грабена и Красноморской рифтовой зоны, внизу — Соляная равнина. 1 — море (а) и суша (б); 2—5 — характерные комплексы пород: 2 — неоген-четвертичные существенно терригенные, 3 — молодые базальты, 4 — мезозойские терригенно-карбонатные, 5 — гипсы, ангидриты; 6 — голоценовые соли, слагающие поверхность равнины; 7 — тектонические нарушения (а), уступы (б); 8, 9 — ориентировочные границы распространения солей: 8 — миоценовых в бассейне Красного моря, 9 — плейстоценовых (формация Хьюстон) в Данакильском грабене; 10 — рассольные озера (а), то же, вне масштаба (б); 11 — месторождение калийных солей Масли; 12 — термальные источники; 13 — вулканические конусы; 14 — вскрытая мощность соляной толщи; 15 — абсолютные отметки поверхности; 16 — разработки самородной серы. Цифры в кружках — основные структурно-тектонические элементы: 1 — Данакильский грабен (впадина Афар), 2 — Соляная равнина, 3 — Гипсовое плато, 4 — Эфиопское плато, 5 — Данакильские Альпы.

ние в глубокой сдвиго-раздвиговой щели с напряженным характером тектоники и флюидодинамики [1].

Однако и по данным показателям у Мертвого моря все же есть достаточно близкий аналог — соленосная структура Данакильской впадины (рис.4), расположенная в другой части той же активной Афро-Аравийской рифтовой системы. Поверхность впадины занята Соляной равниной площадью около 400 км², находящейся на 120 м ниже уровня Красного моря (и уровня океана). Над ней на 70 м возвышается соляной купол горы Даллол с большим количеством рассольных озер (Ассаль, Джульетта и др.). Пышущая жаром равнина покрыта соляной коркой, насыщена натрием, калием, магнием, серой, рассолами и их испарениями [9]. Некоторые рекорды Мертвого моря здесь даже побиты: рассолы еще солонее, а геологическая ситуация еще динамичнее. Минерализация рассолов превышает 350 г/л (достигая 400—460 г/л в озерах с содержанием магния до 90%). Из разломов бьют источники горячих сверхкрепких высокомагниевого рассолов, богатых H₂S и CO₂. Вот что писал об этом, возможно, самом уникальном соляном объекте мира Г.Тазиев: «Мы ходили по соли, жили на соли, шлепали по соляному раствору, шурились от соляной пыли, ночевали в соляных домах и даже видели соляной вулканический расплав... Они (дома. — Г.Б.) образовались в результате поднятия довольно легкой массы калийных солей... Горизонтальная поверхность долины вспучилась куполом высотой в несколько десятков метров и диаметром в несколько километров... Воздействие эрозии, которая создала иллюзию руин, башен, призрачных многоэтажных домов, проложила фантазмагорические бульвары и воздвигла соляные статуи... мертвый серый город...» [9, с.166, 167].

Учитывая, что Мертвое море называют еще и Асфальтовым, интересно упомянуть и о существовании его многочисленных «асфальтовых аналогов», наземных и подводных [2]. Наиболее знаменито среди них оз.Пич-Лейк (что в переводе тоже означает асфальтовое) — еще одно «чудесное явление природы, которое внушает естествоиспытателям чувство восхищения и благоговения»* (рис.5). Этот крупнейший в мире открытый резервуар (площадью около 40 га и глубиной до 80 м) природного асфальта расположен на юго-западе о.Тринидад. Поверхность озера упругая, маслянистая, но неровная — встречаются небольшие лужицы липкого битума. Похожими асфальтовыми озерами чрезвычайно богата Мексика. Их там «буквально тысячи, и размеры их подчас очень велики» [10, с.69]. Сотни таких озер самого разного масштаба описаны и на других побережьях Мексиканского залива, а также в Калифорнии, Венесуэле, Азербайджане и во многих нефтегазо-

* <http://mygeography.ru/article/pich-lake>

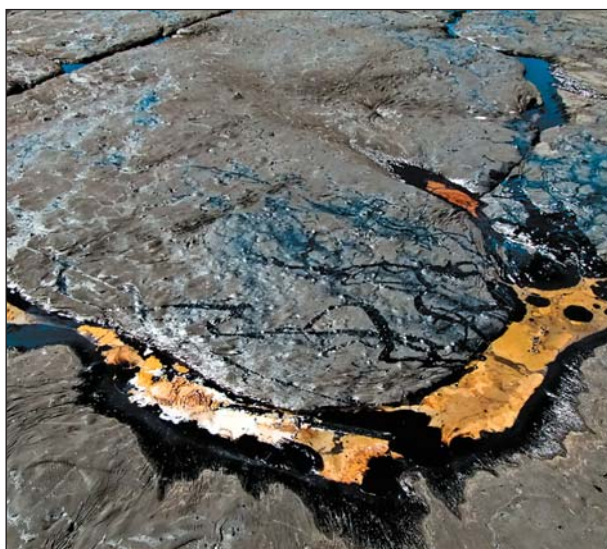


Рис.5. Асфальтовое озеро Пич-Лейк [flickr.com].

носных и соленосных регионах мира. Широко известны крупные нефтяные озера на о.Сахалин. Открыты и масштабные подводные асфальтовые излияния [4, 6].

Аналогия Мертвого моря с другими асфальтовыми озерами приводит к более широким сопоставлениям, касающимся нефтегазоносности недр грабеновой структуры. Все без исключения названные озера находятся в приповерхностных зонах крупнейших нефтегазоносных бассейнов и представляют собой локализованные очаги их современной или недавней разгрузки. Благодаря этому они с успехом используются нефтяниками как достаточно надежный поисковый признак и даже как основание для начала буровых работ [10, 11]. Иначе говоря, эти асфальтовые озера (при всей своей относительной масштабности) — всего лишь своеобразные поверхностные выплески (причем часто продолжающиеся и поныне) подземных нефтегазовых гигантов. А это, наряду с устойчивой сопряженностью разгрузок рассолов и углеводородов, — серьезный аргумент в пользу высокого нефтегазового потенциала глубоких недр под грабеном Мертвого моря и непосредственно примыкающих к нему с запада мезозойских толщ. Такой вывод подтверждает справедливость оптимистичного утверждения Х.Соколиня: «Нефть в районе Мертвого моря будет в конце концов найдена. Иначе и быть не может... Если не под Асфальтовым озером, то где?» [11].

Колебания уровня рассолов — отражение жизни соленосных недр

Режим солеродного бассейна всецело определяется вскрытием на поверхности континента уровня коренных рассолов подземной гидросферы.
А.Ф.Горбов

О современных и древних колебаниях уровня рассолов Мертвого моря. И в голоценовое, и в предшествующее плейстоценовое время он весьма значительно колебался (табл.1, рис.6). Приводимые в литературе сведения позволяют наметить по крайней мере три довольно отчетливых минимума положений уровня: первый — примерно 20 тыс. лет до н.э., второй — около 2000 лет до н.э., третий — начало нашей эры. Обратим внимание на то, что во всех случаях после достижения минимально низкого положения уровня происходил довольно резкий его подъем.

Немного более подробные данные характеризуют два последних столетия — от начала XIX в. до нашего времени (табл.2, рис.6,б). В 1929 г. уровень рассолов достиг наиболее высокого положения. Общее же начавшееся с тех пор его снижение уже приближается к 40 м. Последнее десятилетие скорость опускания возросла и составила не менее 1 м в год. Так, с 2003 по 2005 г. зафиксировано падение уровня с -416.5 м до -418.5 м, в 2010 г. —

до -423 м, а в 2011 г. — до -425.5 м (см. рис.б, в). Ну, а на данный момент он может находиться еще ниже. Итогом происходящего падения стало пересыхание пролива, соединявшего северную и южную части моря, и обособление последних (ныне они соединены искусственным каналом). Северная часть глубоководная, а южная становится все более мелководной, по сути высыхает. Общая поверхность рассолов сократилась с ~1000 км² (всего около 50 лет тому назад) до менее 650 км² (в последние годы) [17].

Все эти разительные изменения прекрасно иллюстрируют космические снимки НАСА (рис.7), где зафиксировано происходящее на наших глазах уменьшение площади Мертвого моря. Если сопоставить нынешнюю ситуацию, вызванную современным падением уровня Мертвого моря, и палеоситуацию, восстановленную по косвенным признакам для времени, предшествующего его падению в начале нашей эры, наблюдается поразительное сходство (см. рис.7,а) [13].

Отмечен еще один важный факт, тесно сопряженный с падением уровня поверхностных рассолов Мертвого моря, — понижение напорного уровня глубинных рассолов (см. рис.7,в). Снижению этих двух уровней сопутствуют увеличение глубины проникновения инфильтрационных вод и рост активности их движения в направлении базиса дренирования — поверхности рассолов Мертвого моря. Это вызывает образование подземных полостей и каналов, а наверху — проседания и провалы грунтов по периметру соляного озера, зыбкость и неустойчивость почвы [18].

Что же влияет на колебания уровней рассольных озер. Главными причинами наблюдаемого в наши дни падения уровня Мертвого моря в прессе называют прежде всего техногенные факторы, изменяющие баланс питания—испарения: чрезмерный забор или отвод воды из Иордана, его главного притока Ярмука и других мелких водотоков, а также выкачивание грунтовых вод и рост вклада соледобывающих испарительных водоемов. Их значимость достаточно очевидна и подтверждается цифрами. Предполагается также и некоторая роль климатических изменений, способных влиять на соотношение питания и испарения. Что касается многократных колебаний уровня Мертвого моря, фиксируемых в прошлые эпохи, то и по отношению к ним в качестве причин обсуждаются, как правило, по сути те же факторы, хотя, естественно, уже целиком природного характера: интенсивность поверхностного (реже и подземного) стока и величина испаряемости.

Вместе с тем картина не столь однозначна. Весьма вероятно прямое или косвенное влияние и других природных геологических процессов, особенно взаимосвязанных тектонических, флюидодинамических, галокинетических.

Для начала заметим, что колебания уровня рассольных озер — явление весьма обычное. Они

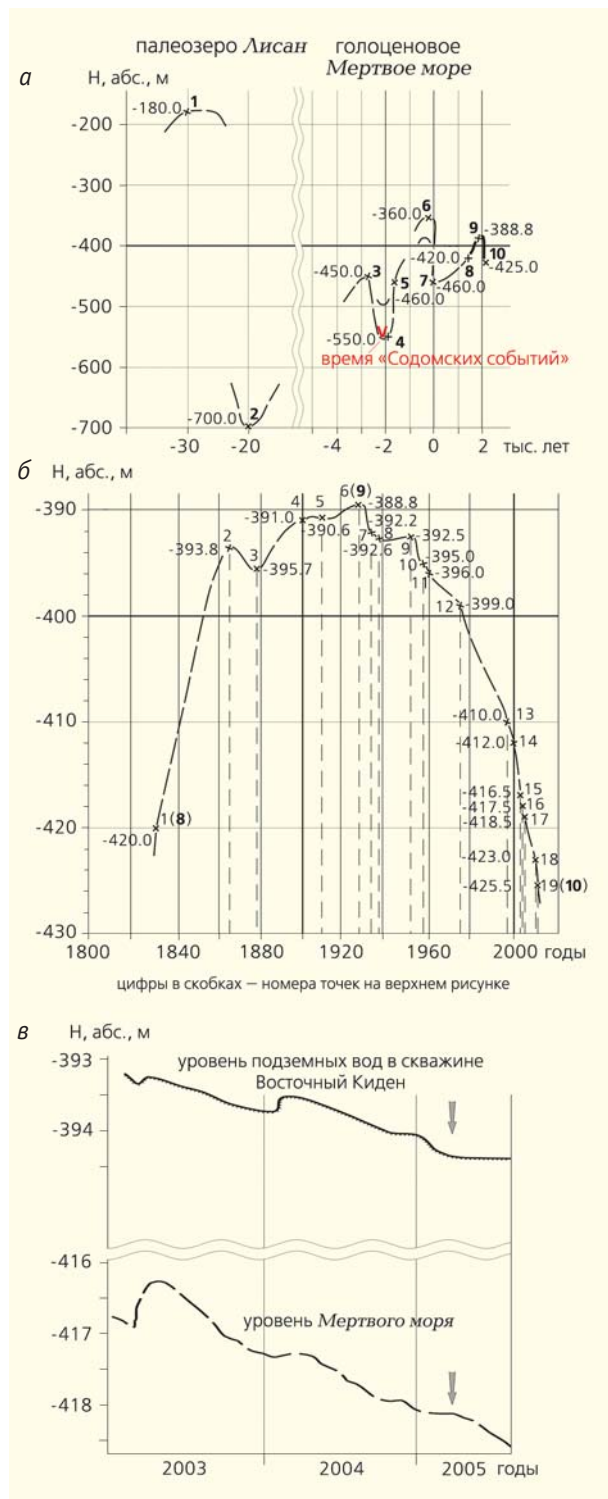


Рис.6. Колебания уровня Мертвого моря [12—17]: а — в течение последних 30 тыс. лет (жирной линией выделен интервал кривой, отвечающий нижнему рисунку); б — от начала XIX в. до начала XXI в.; в — в течение 2003—2005 гг. (согласованные колебания уровня Мертвого моря и напорного уровня подземных вод; замеры в скважине Восточный Киден). Стрелками показаны векторы изменений уровней. Номера точек приведены в таблицах.

Таблица 1

Колебания уровня Мертвого моря в течение последних 30 тыс. лет [12–16]

Номер точки на рис.6,а	Год	Абсолютная отметка ниже уровня моря, м
1	30–20 тыс. лет до н.э.	180.0
2	20–16 тыс. лет до н.э.	700.0
3	2600 до н.э.	450.0
4	1830 до н.э.	550.0
5	1800 до н.э.	460.0
6	100 до н.э. — 0	360.0
7	0	460.0
8	1830	420.0
9	1929	388.8
10	2011	425.5

Таблица 2

Колебания уровня Мертвого моря с XIX по начало XXI в. [12–18]

Номер точки на рис.6,б	Год	Абсолютная отметка ниже уровня моря, м
1	1830	420.0
2	1865	393.8
3	1879	395.7
4	1900	391.0
5	1910	390.6
6	1929	388.8
7	1935	392.2
8	1938	392.6
9	1955	392.5
10	1958	395.0
11	1960	396.0
12	1976	99.0
13	1997	410.0
14	2000	412.0
15	2003	416.5
16	2004	417.5
17	2005	418.5
18	2010	423.0
19	2011	425.5

обусловлены (по крайней мере частично) не только климатическими и техногенными, но и другими — внутренними — причинами. Прежде всего двумя: во-первых, вариациями напоров подземных рассолов и интенсивности их разгрузки; во-вторых, изменениями емкостей самих рассолоносных водоемов в результате трансформаций поверхности соляных масс. Неоднократно отмечалось, что «с различными формами тектогенеза связаны пульсационные скачкообразные восходящие перемещения как жидких и газообразных, так и полужидких, пластичных масс... Тектогенез возбуждает широкую пульсационную современную миграцию флюидных и текучепластичных масс в земной коре, особенно в ее активированных зонах» [19, с.22–23].

Вариации напоров подземных рассолов и интенсивности их разгрузки фиксируются инстру-

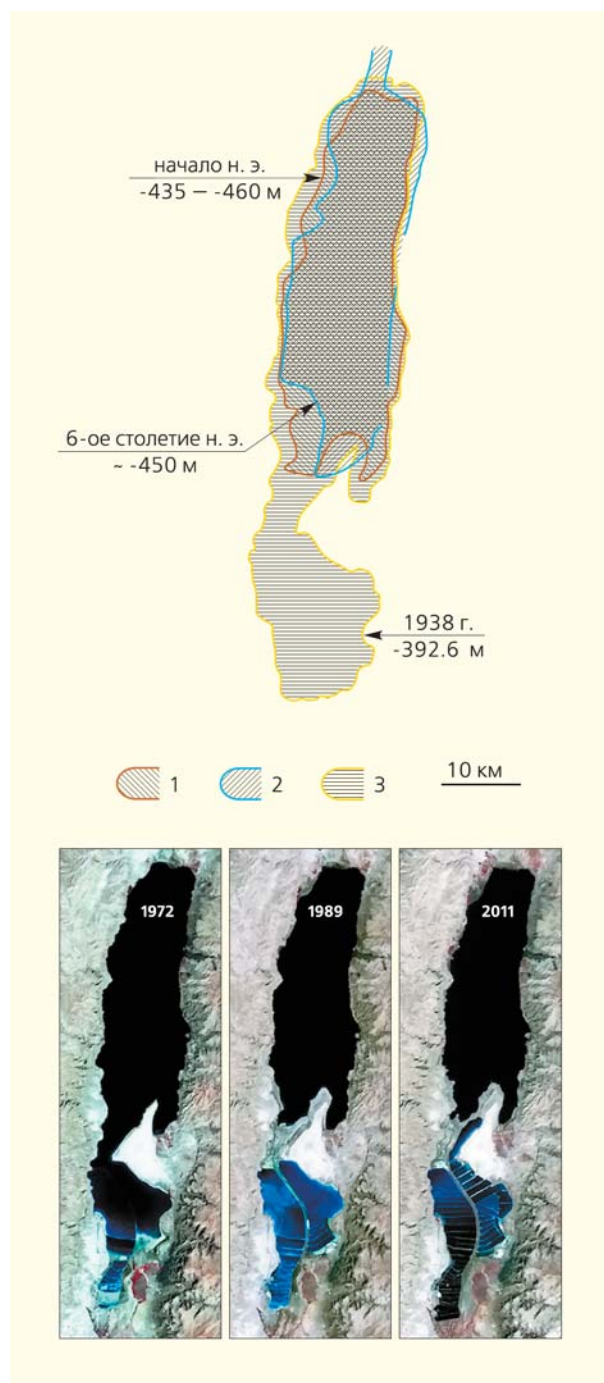


Рис.7. Изменение контуров акватории Мертвого моря в связи с изменением положения уровня рассолов. Вверху — изменения контуров на фоне подъема уровня от минимального около 2000 лет назад до максимального в середине XX в. (отвечает интервалу между точками 7 и 9 на рис.6а) [13]: 1 — начало нашей эры (-435 — -460 м), 2 — ~VI в. н.э., по Мадабской карте (~450 м), 3 — 1938 г. (-392.6 м). Внизу — изменения контуров на фоне современного падения уровня с 1972 по 2011 г. (отвечает интервалу между точками 9 и 10 на рис.6а): 1972 г. — -398 м, 1989 г. — -405 м, 2011 г. — -425.5 м.

Фото Nasa

ментально и отслеживаются в ходе режимных наблюдений во многих солянокупольных бассейнах [3, 20–22]. Отмечалась также и трансформация поверхности соляных тел, происходящая при изменении их рельефа (надземного и подземного) в результате перераспределения соляных масс. Интенсивное развитие этих процессов обязано реологическим особенностям солей — их пластичности, возрастающей с увеличением температуры и давления, низкому удельному весу ($2.1\text{--}2.2\text{ г/см}^3$) и малой сжимаемости при росте давления. «Появление соли... как катализатора в тектогенезе и формировании рельефа земной коры имеет большое значение», — писал Ф.Трусхейм [21, с.78]. Именно под воздействием дифференцированных тектонических подвижек происходят рост соляных куполов и прогибание впадин, т.е. те разнонаправленные перемещения солей, которые наиболее заметно проявляются в образовании и эволюции галопар, в изменениях высоты гор-диапиров, глубины и размеров мульд (депрессий) и занимающих их рассольных водоемов.

Интересные конкретные данные о современной кинетике подземных рассолов и солей, об изменениях рельефа поверхности последних получены в разные годы на специальных полигонах на солянокупольных структурах Прикаспия. Здесь зафиксированы постоянные вертикальные и горизонтальные движения, устойчивые общие фоновые тенденции (унаследованный рост куполов и погружение мульд, но при этом нестабильность знаков движения во времени с периодическими инверсиями их векторов). Установлена согласованность движения солей с изменениями напоров подземных вод, глубин их залегания, химического состава [3, 22].

Все это позволяет считать, что кинетика соляных масс и подземных рассолов в приповерхностных областях служит одним из важнейших регуляторов уровня рассолов в водоемах, заполняющих соляные чаши. А значит, интересующие нас колебания уровня рассолоносных водоемов, весьма обычные для солянокупольных бассейнов, во многом зависят от вариаций флюидодинамической напряженности соленосных недр.

Этот вывод, сделанный на основании материала из тектонически относительно спокойных обстановок, в еще большей мере справедлив в отношении бассейна Мертвого моря, который расположен непосредственно в активной структуре с контрастными показателями полей напряжения и их значительными перепадами в пространстве и во времени.

Таким образом, есть веские основания полагать, что колебания уровня Мертвого моря (современные и былые), наряду с обычно обсуждаемыми причинами, обусловлены разнообразными факторами флюидодинамической и галокинетической природы: изменениями конфигурации по-

верхности соляного тела и общей емкости наддиапировых водоемов, напоров подземных рассолов, степени заполнения рассолами водоемов и, как результат, — положения их уровней. По-видимому, именно изменения в характере тектонических напряжений в бортах и субстрате Мертвого моря могут быть наиболее общей причиной прогибания кровли выполняющих грабен солей.

Проявлением (и подтверждением) значимых подвижек соляных масс в плейстоцене стали компенсационные палеомульды, выполненные осадками мощностью 500–1000 м, и соляные поднятия. В голоцене наиболее глубокий прогиб в поверхности соляного тела определил положение дна впадины Мертвого моря (на абсолютных отметках около -800 м). Разнообразные прямые и косвенные признаки свидетельствуют и о совсем недавних подвижках его поверхности. Так, на основании расшифровки развития карстовых систем и террас восстановлены детали неравномерного и дискретного роста соляного купола горы Седом, продолжающегося до сих пор [13, 23]. Поднятие этих соляных масс до 220 м над уровнем земной поверхности может отражать еще сохранившийся у восходящих солей резерв подъемной силы. Высокие энергии соленосных недр суть «выражение борьбы между подъемной силой и противодействующей силой тяжести толщ стратисферы» [19]. Свидетельством вертикальных погружений самого грабена Мертвого моря, по-видимому, справедливо считаются и некоторые гравитационные складки, осложняющие породы формации Лисан. Все эти разнообразные перемещения соляных масс, безусловно, оказывали (и оказывают) влияние на размеры и морфологию вмещающей чаши и на уровень выполняющих ее рассолов.

Вариации же в напоре и интенсивности разгрузок восходящих рассолов Мертвого моря в недавнем прошлом запечатлены в многочисленных вещественных и морфологических проявлениях — в различных минеральных новообразованиях, скоплениях битумов, самородной серы и др. [1].

* * *

Итак, очевидно, что уровень рассолов Мертвого моря и его предшественников в течение всей их жизни испытывал весьма значительные естественные циклические колебания. Их можно считать вполне нормальным и закономерным проявлением жизни недр этого моря-озера — прошлой и настоящей. И с этим следует считаться.

Данный факт необходимо учитывать при обосновании происходящих ныне драматических перемены — чрезвычайно быстрого снижения уровня Мертвого моря, которое вызывает все большую тревогу. Прежде всего при планировании любых мероприятий и по дальнейшему использованию его рассолов, и, особенно, по восстановлению его уровня путем прокладки каналов или трубопроводов. Не вполне ясно, насколько серьезно исследу-

ется и весьма реальная угроза со стороны вновь поступающих вод в результате неизбежных химических взаимодействий. Эффекты высаливания при смешении рассолов с морскими водами весьма разнообразны и значимы. Они неоднократно обсуждались геологами-солевидами и гидрогеохимиками. В любом случае итогом может быть потеря рассолами Мертвого моря их уникальных и высокоценных свойств. Ситуация во многом близка к той, которая возникла во второй половине XX в. в заливе Кара-Богаз-Гол. Тогда, в ответ на природ-

ные изменения уровня Каспийского моря (оказавшиеся временными), попытались искусственно регулировать соотношение уровней моря и залива без учета других природных регуляторов. В результате построенная с этой целью дамба ныне взорвана, а соляное богатство залива испорчено.

Не исключено также, что и падение уровня Мертвого моря может оказаться временным. Глубокий «выдох» недр (спад напряженности) может смениться новым «вдохом» и привести к подъему дна, а возможно, и всей соленосной системы. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 10-05-00555-а.

Литература

1. Беленицкая Г.А. Соленосное чудо планеты // Природа. 2013. №6. С.21—32.
2. Беленицкая Г.А. Происхождение солей, диапиров и рассолов Мертвого моря // Природа. 2013. №8. С.28—37.
3. Певнев А.К. Современные движения земной поверхности в районе Баскунчакской солянокупольной структуры. М., 1968.
4. Беленицкая Г.А. Глобальные соляно-нафтидные узлы // Природа. 2013. №1. С.11—23.
5. Тектоническая карта Прикаспийской впадины 1:1000000 / Под ред. Л.Г.Кирюхина. М., 1982.
6. Беленицкая Г.А. Мексиканский соляно-нефтяной реактор // Природа. 2011. №3. С.18—31.
7. Высоцкий Э.А. Тектонические типы бассейнов калиенакопления // Условия образования месторождений калийных солей. Новосибирск, 1990. С.23—29.
8. Иванов А.А. Месторождение калийных солей Масли в Эфиопии // Сов. геология. 1970. №7. С.118—123.
9. Тазиев Г. Запах серы. М., 1980.
10. Перродон А. История крупных открытий нефти и газа. М., 1994.
11. Соколин Х. Землетрясение в Израиле (Военно-политический аспект) // Сетевой журнал «Заметки по еврейской истории» / Ред. Е.Беркович. 2012. №6, 7.
12. Bentor Y.K. Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age // *Geochem. et cosmochim. acta*. 1961. V.25. P.239—260.
13. Neev D., Emery K.O. The Dead Sea depositional processes and environments of evaporates. Jerusalem, 1967.
14. Трифонов В.Г., Караханян А.С. Геодинамика и история цивилизаций / Отв. ред. Ю.Г.Леонов. М., 2004.
15. Хаин В.Е., Короновский Н.В. Геомифология — новое направление в науке // Природа. 2009. №4. С.9—17.
16. Клейн К. Флуктуации уровня Мертвого моря и климатических колебаний в стране в исторические времена // Симпозиум МАГН. Иерусалим, 1985. С.197—224.
17. Shalev E., Lyakhovskiy V., Yechieli Y. Is advective heat transport significant at the Dead Sea basin? // *Geofluids*. 2007. №7. P.292—300.
18. Long-term changes in the Dead Sea. Israel Marine Data Center, 2011.
19. Аникиев К.А. Аномально высокие пластовые давления в нефтяных и газовых месторождениях. Л., 1964.
20. Дзэнс-Литовский А.И. Соляные озера СССР и их минеральные богатства. Л., 1968.
21. Трусхейм Ф. Галокинез // Структурная геология и тектоника плит. Т.1 / Под ред. К.Сейферта. М., 1990. С.70—80.
22. Кузнецова С.В. Аномалии геологической среды солянокупольных бассейнов и их влияние на природно-технические системы и среду обитания человека. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Волгоград, 2000.
23. Zak I., Bentor Y.K. Some new data on the salt deposits of the Dead Sea area, Israel // *Geol. of saline deposits. Proc. Hanover Symp.*, 1968. UNESCO, 1972. Earth Sciences. №7. P.137—144.

Заметки о скорпионах и скорпиологах

В.Я.Фет

«**В**от уж кто не изменился в ходе эволюции! Консервативней “зверя” нет, — скажут умные студенты-зоологи — Что за скука их изучать? То же самое многосегментное тело, что и 400 млн (!) лет назад, те же клешни, та же парная ядовитая железа в пузырьке на конце хвоста-метасомы... Девонские, да и силурские формы неотличимы от современных. По разнообразию органов и структур не сравнить с насекомыми, не говоря уже о динозаврах, птицах, китах, ленивцах, муравьядах».

Ну да, так и в учебнике написано. Но это-то и интересно. Ведь если какая-то группа выжила с тех времен, значит, она несет в себе, как в капсуле времени, все гены и белки прошлых лет. Изучая их, мы никогда не будем в проигрыше. Находим нечто анцестральное, общее с другими — стало быть, оно древнейшего происхождения. Находим же нечто производное, уникальное для скорпионов, — значит, появилось оно только в этой ветви, может быть, и в древнейшие времена, и дошло до наших дней.

Выжить в течение сотен миллионов лет, обладая мощнейшим ядом, было нехитро. Медузы, к примеру, вообще даже настоящих органов не приобрели — зачем, коли есть оружие? (Так и в истории бывает со многими деятелями и даже государ-

*Полно, дети! Не полюбит человека скорпион,
Меж существ как раз разрубит цепь невидимую он.
Из случайности созданий он противнее всего,
Нет разумных оправданий прозябанию его.
Пусть с богами в поединке сгинут римлянин и грек,
Вечно зрит в своем ботинке скорпиона человек.
Нет, у нас нет общей цели — у него и у меня;
Скорпион в янтарном теле — мне не ровня, не родня.*



Виктор Яковлевич Фет, кандидат биологических наук, ученик Р.Л.Берга, преподает биологию в университете Маршалла (Западная Виргиния, США). Область научных интересов — систематика и эволюция скорпионов, биогеография, история науки. Автор многочисленных научных публикаций, в том числе монографии «*Catalog of the Scorpions of the World*» (2000). Поэт, автор четырех сборников стихов.

ствами.) Яд скорпиона имеет вполне «разумный дизайн»: олигопептиды, прочно скрепленные дисульфидными мостиками; связываясь с трансмембранными белками-каналами, препятствуют реполяризации клетки, останавливая и мускул, и нерв.

Впрочем, я не занимаюсь ядами, ведь у скорпионов столько интересного... Так, у них (и только у них!) кутикула светится под воздействием ультрафиолета! Несколько молекул-флюорохромов этого наружного слоя хитиново-белкового панциря скорпионов превращают длинноволновые (около 380 нм) ультрафиолетовые лучи в видимый голубовато-зеленый свет. Зачем нужна флюоресценция? Есть ли на нее отбор? Да и наблюдается ли она в естественных условиях?

Мой коллега Д.Гаффин в Оклахоме — один из немногих в мире, кто изучает сегодня физиологию органов чувств скорпионов. Он считает, что их фоторецепторы, особо чувствительные именно в голубоватом спектре, позволяют скорпионам *видеть*, причем *всем телом*. Глаза как обычный орган зрения у них плохо работают — они сильно редуцированы по сравнению с предковыми сложными глазами палеозойских морских скорпионов. Но ведь эти существа



Реликтовый скорпион *Protoiurus asiaticus* (Таврские горы, Турция).



Темный и светлый фенотипы «гиганта-волосатика» *Hadirus anzaborrego* (Калифорния, США).

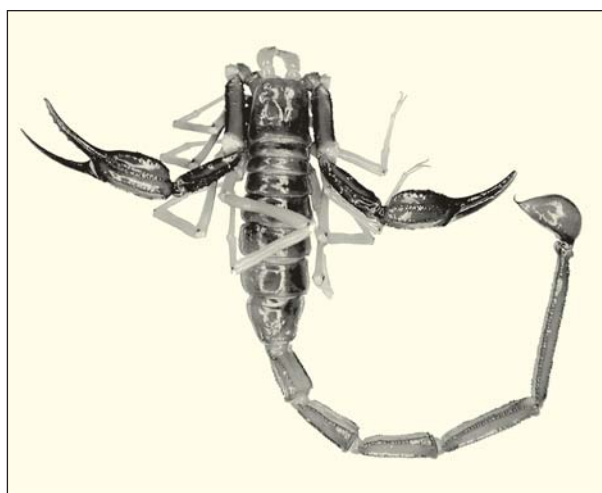
На этой странице фото М.Солеглада

сугубо ночные, откуда же берется ультрафиолет? Похоже, что в ночной атмосфере достаточно рассеянного солнечного света, чтобы древние членистоногие предстали друг другу в виде слабо светящихся призраков, как созвездия, упавшие на темный песок.

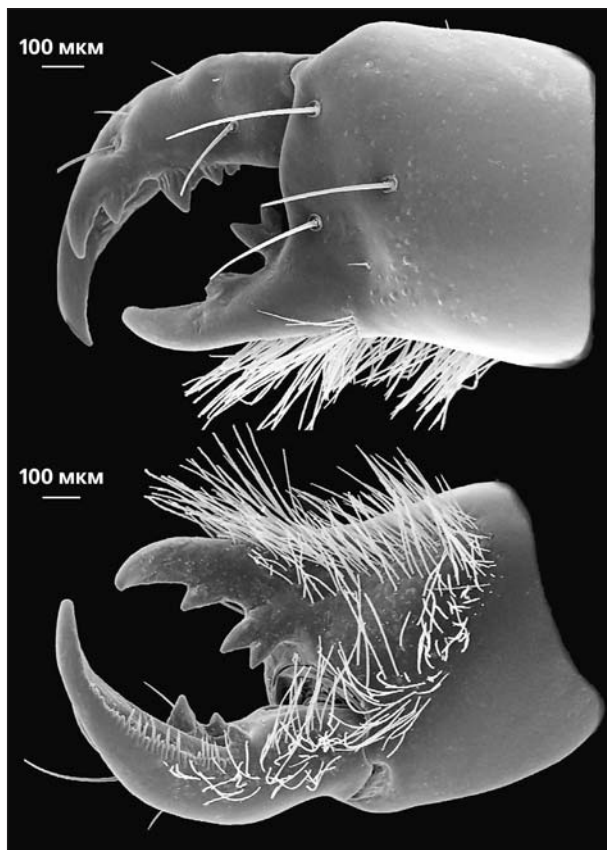
Да мало ли что неизвестно нам о них? Мы с моим аспирантом М.Брюером, положив в очередной раз клешню скорпиона под сканирующий электронный микроскоп, обнаружили на самом ее кончике скопление нескольких сенсоров, не похожих ни на какие другие и образующих нечто вроде созвездия Кассиопеи. Подробное исследование показало, что скопление это (мы по праву первооткрывателей и назвали его созвездием, constellation) есть у всех скорпионов в мире. Гаффин думает, что это терморцепторы, температурные датчики. У скорпионов, в отличие от насекомых, нет антенн, а ноги заняты землей, поэтому все сенсоры сосредоточены на клешнях, а также на хвосте. Им же скорпионы и колют жертву, «через голову», — стратегически хвост часто висит впереди головы, и его очень удобно использовать вместо антенн. Это называется антеннализацией конечностей.

По внешнему консервативному облику (клешни, хвост) все скорпионы — на одно лицо. Зоолог,

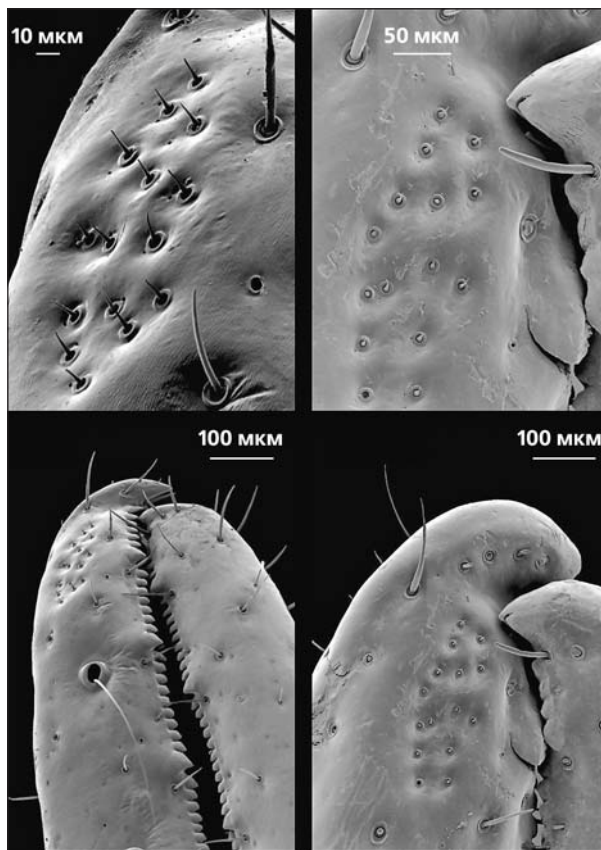
собирающий малоизученных вислокрылок или ногохвосток, увидев очередного скорпиона, думает, что его наверняка описал еще Линней. Однако мы с коллегой из Афинского университета А.Пармакелисом до сих пор продолжаем находить



Пещерный скорпион *Alacran tartarus* (Мексика), родственник израильского рода *Akrav*.



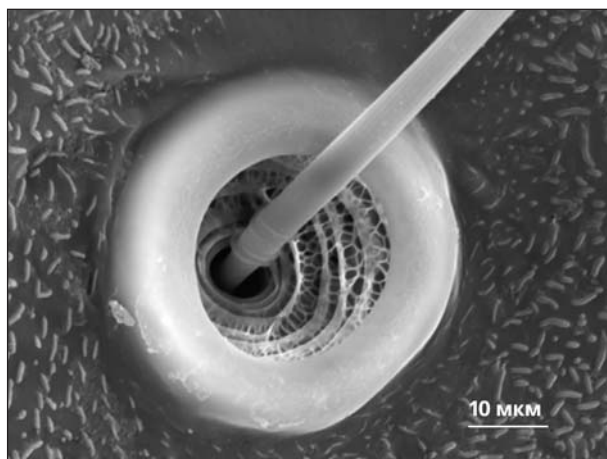
Хелицеры (челюсти) реликтового скорпиона *Calchas birulai* (Немрут-Даг, юго-восточная Турция).



«Созвездие» сенсилл на кончиках «пальцев» клешни *Neocalchas gruberi* (Анталья, Турция).

На этой странице фото автора

в Греции никем не описанные эндемичные виды скорпионов. Практически везде — от населенного богами Олимпа до богатого мрамором Пароса, от ариадниного Крита до даррелловского Корфу,



Основание механорецепторной щетинки-трихоботрии на клешне *Neocalchas gruberi* (Анталья, Турция). Скорпионы используют трихоботрии для охоты, регистрируя малейшие движения воздуха.

в горах Эпира и Фессалии и на многих островах Эгейского моря — ждали нас неожиданные находки. В музеях греческие скорпионы редки, но несколько типовых экземпляров очутились в России. Я проследил не только происхождение скорпионов, но и интересную судьбу их собирателей. Студент-этнограф А.Н.Харузин (1864—1932) привез в 1886 г. два новых вида в Зоомузей Московского университета со святой горы Афон в греческой Македонии. Один из них назвали в честь директора музея Г.А.Кожевникова, родоначальника природоохранного движения в России. Впоследствии Харузин стал известным этнографом и антропологом; в 1904—1909 гг. он был губернатором Бессарабии, после 1911 г. — товарищем министра внутренних дел; в 1927 г. и снова в 1931-м был арестован, а через год умер в тюрьме.

Еще один новый вид нашел на Крите судовой врач крейсера «Герцог Эдинбургский» Н.П.Боголюбов в 1898 г. Его зоологические экскурсии пришлись на один из самых драматических периодов в истории древнего острова. Российская эскадра под командой адмирала Н.И.Скрыдлова участвовала тогда в редкой операции шести держав (Великобритании, Франции, Германии, Италии, Австро-Венгрии, России) по поддержанию мира на ост-

рове, находившемся с XVII в. под властью турок. В декабре 1898 г. было учреждено автономное Критское государство, а через 10 лет Крит присоединился к независимой Греции.

Степень исторической дивергенции греческих видов оказывается чрезвычайно глубокой. На первый взгляд они ничем не отличаются друг от друга. Я встречался с понятным скептицизмом коллег, которые привыкли к определительным таблицам с четкими тезами-антитезами. Различая виды по внешнему облику, мы традиционно принимаем их морфологические отличия как аксиому. Однако теперь известно, что именно среди скорпионов обычны так называемые скрытые, криптические виды, или *виды-двойники*, морфологически слабо различимые, но репродуктивно изолированные.

Несмотря на древность скорпионов, ископаемых находок не так много, а из мезозоя известно всего 20—30 экземпляров. Однако кайнозойские янтари (олигоценовые балтийские и более молодые доминиканские) содержат уже вполне современные виды, родственники которых сохранились в тропических широтах Африки, Азии и Америки. В более древних янтарях скорпионы встречаются редко, среди них бирманские и ливанские — меловые, возрастом около 100 млн лет, еще динозавровых времен.

Один такой древний хвостик из Бирмы хранился с 20-х годов прошлого века в Британском музее. Я увидел его в 2000 г. и сперва не придал значения — хвост у скорпионов совсем не информативная часть, и описать вид по нему трудно. Однако мой коллега из Смитсоновского института в Вашингтоне, специалист по янтарям Х.Сантьяго-Блэй, заинтересовался экспонатом, и мы выписали его по почте. Есть такой нехитрый секрет: капля минерального масла на поверхности драгоценности позволяет заглянуть в полупрозрачную среду на пару миллиметров глубже. И действительно, под хвостиком обнаружилось несколько разрозненных конечностей. Видимо, смола древнего дерева попала на уже кем-то сильно растерзанного скорпиона. При ближайшем рассмотрении мы увидели и клешню с вытянутыми «пальцами». А клешня — это самая информативная часть скорпионового тела! Именно на ней находятся чувствительные волоски, трихоботрии, расположение которых в форме созвездий служит для таксономии скорпионов своеобразной эмблемой. Поскольку волосков этих разумное количество, штук 30 на клешню, скорпиологи считают их уже много лет и делают свои выводы. Первым начал эту практику французский скорпиолог М.Вашон, работавший в послевоенные годы в алжирском Пастеровском институте.

После испытания французами атомной бомбы в Сахаре были опубликованы учеты выживших там скорпионов. Потом много лет изучали их устойчивость к радиации, но так до конца и не по-



Кончик метасомы «хвоста» ископаемого скорпиона *Paleoburmesebutus grimaldii* (Бирма, янтарь мелового периода). Из коллекции Британского музея (Лондон).

На этой странице фото Х.Сантьяго-Блэй

няли ее причины — наследие ли это древности с ее жесткими излучениями или следствие особой физиологии. Известно, что скорпионы большую часть жизни погружены в некий сон; метаболизм их чрезвычайно медленный, потому и живут они долго — не как прочие членистоногие. Половая зрелость у скорпионов наступает на втором-третьем году жизни, детенышей самки вынашивают внутри до года, а потом носят их на спине, пока не подрастут!

Один из наиболее уникальных скорпионов мира — *Akrav israchanani* из гигантской подземной



Ископаемый *Uintascorpio halandrasorum* (Колорадо, США, средний эоцен). Из коллекции Денверского музея.



Сухие шкурки, клешни и сегменты хвоста пещерного скорпиона *Akrav israchanani* (Израиль). Из коллекции Еврейского университета (Иерусалим).

Фото автора и С.Зонштейна

пещеры Аялон вблизи побережья Средиземного моря в Израиле. В 2007 г. его описал израильский арахнолог Г.Леви (1937—2009). «Акрав» на иврите — скорпион, а видовое имя — комбинация из имен спелеологов Израэля Наамана и Ханана Диментмана. Мы не знаем, существует ли в природе акрав, известный лишь по сухим останкам-шкуркам, найденным в пещере. Спелеологи надеются, что в других подобных пещерах и кавернах еще обитают представители этого вида. В пещере Аялон популяция вымерла — похоже, что в результате затопления, причем не слишком давно. Мумифицированные, но прекрасно сохранившиеся останки этих слепых скорпионов (мы насчитали до 30 экземпляров) хранятся в коллекции Еврейского университета в Иерусалиме. В 2010 г. мы с С.Зонштейном из Тель-Авивского университета провели над этими шкурками много часов.

Недаром сказано об этих местах: «Стой, солнце, над Гаваоном, и луна, над долиною Аялонскою!» Аялон — замкнутая экосистема. Пещера была изолирована от внешнего мира до 2006 г., пока ее случайно не вскрыли при разработке залежей гипса. Поразительная трофическая цепь Аялона начинается в подземном озере, где живут бактерии-хемосинтетики, простейшие и слепые ракообразные (несколько новых видов), по одному новому виду ногохвосток и ложноскорпионов. Чем же питался акрав, существо достаточно крупное (длина клешни до 13 мм)? Мы полагаем, что свои уникальные крючко-клювообразно загнутые кончики клешней он использовал для ловли рако-



Песчаный скорпион *Smeringurus mesaensis* (Аризона, США).

Фото Г.Лоу

образных рода *Typhlocaris*. Этот слепой обитатель пещеры по размеру (20–27 мм в длину) годился быть добычей слепого же хищника. Слепые поедатели слепых — чем не метафора!

Хорошо сохранившиеся шкурки акрава позволили нам с М.Солегладом (Калифорния) детально изучить этого обитателя подземелий и сделать неожиданное заключение о его систематической принадлежности. Леви выделил новый род в особое семейство *Akravidae*, чрезвычайно отличное от современной, аридной фауны скорпионов Ближнего Востока. Отличия акрава подтверждаются, но также очевидно его несомненное и близкое сходство с некоторыми группами североамериканских (из Мексики и США) скорпионов, обитающих там в лесной подстилке и в пещерах. Мы не видим различий, которые позволили бы отнести их к разным семействам, несмотря на гигантский географический разрыв.

Реликтовые разрывы ареалов такого рода нередки среди скорпионов. В последние годы мы с коллегами посвятили немало времени изучению реликтового семейства *Iuridae*, обитающего в Восточном Средиземноморье. Помимо проче-

го, эти гигантские черные существа имеют уникальные нежные щеточки на «подошвах» для умыывания.

Казалось бы, десятки зоологов и многие тысячи туристов прошли через курортные места Анталии, Родоса и Крита — однако именно там находились новые виды и даже роды семейства *Iuridae*, надежно прячущиеся в скалах и пещерах. Особенно важными стали собранные здесь полевые коллекции молодого турецкого зоолога Э.Ягмура, прошедшего в поисках реликтов сотни километров по горам Анатолийского п-ова.

Еще 100 лет назад одним из первых обратил внимание на иурид петербургский зоолог А.А.Бялыницкий-Бируля (1864–1937). Этот специалист по скорпионам и фалангам Старого Света в молодости занимался полярной зоологией, сопровождал знаменитую экспедицию барона Э.Толля и будущего адмирала А.Колчака. За знакомство с последним, видимо, и был отправлен в 1930 г. в Беломоро-Балтийский лагерь, будучи уже директором Зоомузея, того самого, что через Неву от Эрмитажа. Последняя работа Бялыницкого-Бируля по фауне Йемена (на материале, собранном диплома-

том — работником НКВД, увлекавшимся зоологией) опубликована посмертно в 1937 г.

Задолго до революции Бируля описал греческие сборы Боголюбова и Харузина (о них уже говорилось), а также род *Calchas*, названный в честь гомеровского прорицателя из «Илиады». Несколько экземпляров этого редкого существа русские зоологи привезли из бассейна р. Чорох (Лазистан) в Карсской обл., к югу от Аджарии. В 1918 г. эта часть Российской империи отошла к кемалевской Турции. Из-за удаленности и запутанности закавказской геополитики тех лет европейские зоологи потеряли калхаса из виду на полвека. Род даже не числился в фауне Турции!

Первые экземпляры калхаса в европейских коллекциях появились только в 1960-х годах. Сейчас, после скрупулезной экспедиционной работы Э. Ягмура, мы установили картину обитания уже нескольких видов калхаса. Эти аллопатрические, с разорванным ареалом, виды, как на иллюстрации из классического учебника, обитают в трех разделенных горами экологических зонах Анатолии: Черноморской (на самом юге Кавказа), Средиземноморской (включая Анталию), и на полупустынном юго-востоке (который в Турции по политическим соображениям нельзя называть Курдистаном). Мы описали и новый род *Neocalchas*, типовое местонахождение которого — крепость Мамуре на побережье Турции, построенная еще в римские времена для защиты от пиратов. А наша коллега Я. Стати из Критского университета описала редкого неокалхаса и в самой восточной точке территории Греции — на миниатюрном острове Мегисти (Кастелоризо) у турецких берегов. Эти береговые острова Эгейского моря исторически часто соединялись с азиатским материком, и фауна у них соответствующая.

И вот еще о разрывах ареалов. Ближайшие родственники турецко-греческих иурид — семейство *Sarabostonidae* — обычны в Новом Свете. Среди них хорошо известен род *Hadrurus* из пустынь США и Мексики — так называемый Giant Hairy, «гигантский волосатый скорпион». Наверное, хадрурус (его длина 15 см) — самый крупный беспозвоночный хищник Северной Америки. Его экологию изучал в свое время мой друг Г. Полис (1946—2000), один из лучших скорпиологов мира, трагически погибший в экспедиции в Мексику, на п-ов Нижняя Калифорния. Он оставил нам классический том «Биология скорпионов», опубликованный Стэнфордским университетом в 1990 г. А совсем недавно по молекулярной филогении хадрурусов защитил диссертацию мой быв-

ший студент М. Грэхем, изучавший скорпионов Долины Смерти (Калифорния), знаменитой по ковбойским фильмам.

Родичи гиганта-волосатика живут в Южной Америке — от пустыни Атакама в Чили до экваторских тропиков. Мне изредка присылают этих нелегальных мигрантов, попадающих в США из Эквадора с бананами — и у них на «пятках» те же самые уютные щеточки, как у турецких кузенов.

Другой, еще более необыкновенный и совсем недавно открытый вид скорпионов — *Pseudochactas ovchinnikovi*. Его в 1998 г. описал алма-атинский зоолог А. В. Громов; мне довелось ловить представителей этого вида в 2002 г. в Узбекистане. Это незаметное полупрозрачное животное известно из долины Сурхандарьи в предгорьях хребта Бабатаг, на стыке Узбекистана с Таджикистаном и Афганистаном. Вид был назван в честь нашего коллеги, зоолога С. Овчинникова, нелепо погибшего недавно в Бишкеке.

Что же замечательного в этом неприглядном существе? Оказывается, оно сочетает в себе настолько древние черты, что приходится считать псевдохактаса не только отдельным семейством, как правильно установил Громов, но и совсем отдельной, по счету четвертой ветвью ныне живущих скорпионов. Возраст расхождения четырех групп, по приблизительным оценкам, мезозойский, и сравним, видимо, со временем расхождения ветвей позвоночных-амниот (рептилий и птиц). Псевдохактас, хотя и живет в окружении сухих гор, — совсем не пустынное животное, по экологии напоминает мокрицу, ночью бегаёт по влажной глине в пойме ручья. Думается, бегал он там уже при динозаврах, как и сейчас преспокойно выползает ночью, когда стадо коров из ближайшего узбекского кишлака напьется и уйдет домой спать.

Новый вид псевдохактаса прислал нам недавно немецкий натуралист-любитель М. Миш из перманентно фронтальной зоны Афганистана, по южную сторону Гиндукуша. И уж совсем неожиданно скорпионы двух новых родов этого же семейства были найдены в пещерах Лаоса и Вьетнама. Теперь остается «только» поискать их между Афганистаном и Вьетнамом. Не собирается ли кто в тибетские пещеры на поиски Шамбалы? Захватите ультрафиолетовый фонарь для поиска скорпионов... Экспедиция продолжается. Как писал (похоже, и для нас), Николай Степанович Гумилев:

Как будто не все пересчитаны звезды,
Как будто наш мир не открыт до конца. ■

Вулкан Толбачик: гавайские извержения на Камчатке

А.Б.Белоусов, М.Г.Белоусова,
кандидаты геолого-минералогических наук
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Петропавловск-Камчатский



В мире нет двух одинаковых вулканов. У каждого свои неповторимые размеры, форма, рисунок поверхности склонов. Характер и частота извержений даже у соседствующих вулканов сильно различаются. На облик и поведение вулкана оказывают влияние объем и состав извергаемых магм, степень их газонасыщенности и многие другие факторы, например, местный климат. Вулканы имеют сложную и длительную (до нескольких сотен тысяч и даже миллионов лет) историю развития, которая запечатлевается в последовательностях отложенных слоев лав и пирокластики, отражается в строении их конусов.

Вести из экзотических

Необычный вулкан Камчатки

Постройка Толбачика состоит из двух сросшихся конусов, форма которых определила их названия (рис.1). Острый, высотой 3672 м, более древний, считается потухшим. На глубоко эродированных склонах траверсируются вертикальные стенки многочисленных даек — заполненных застывшей магмой подводящих трещин прошлых побочных извержений. С юго-восточной стороны конус Острого Толбачика обрывается крутым цирком гигантского обвала, а с востока к нему плотно прилегает сильно усеченный конус вулкана Плоский Толбачик высотой 3065 м. Среди активных вулканов Камчатки он выделяется извержениями базальтовой магмы, обладающей относительно малой вязкостью. Потому-то он и плоский. Несколько раз за последние 10 тыс. лет на его склонах раскрывались трещины, по которым жидкая магма оттекала из неглубокого очага, и макушка конуса проваливалась внутрь, образуя небольшую вершинную кальдеру. Она при последующем возобновлении

© Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.,
2013



Рис.1. Вулкан Толбачик. Вид с севера. Новое извержение происходит на южном склоне Плоского Толбачика. На переднем плане — вулкан Безымянный с подковообразным кратером, знаменитый своим мощным обвалом и взрывом в 1956 г. В отличие от маловязких базальтов Толбачика, Безымянный извергает очень вязкие андезиты.

Здесь и далее (кроме рис.2) фото А.Б.Белюсова

вулканической активности постепенно заполнялась горизонтальными слоями лавы, пока не происходило новое проседание. В результате сформировался легко узнаваемый сильно усеченный конус. На его плоской вершине видны следы нескольких вложенных одна в другую небольших кальдер.

Низкая вязкость магмы определяет характер извержений Толбачика — они очень похожи на гавайские. В вершинной кальдере вулкана время от времени появляется озеро расплавленной лавы (последнее существовало в 1967—1970 гг.). Когда же на склонах происходят побочные прорывы, вдоль раскрывшихся протяженных трещин выбрасываются высокие огненно-красные лавовые фонтаны, и жидкая, как вода, лава растекается на многие километры. Цепочки шлаковых конусов, трассирующие трещины прорывов, расходятся от Плоского Толбачика в двух основных направлениях (рифтовых зонах) — северо-восточном и южном. В XX в. побочные извержения вулкана происходили только в более крупной южной зоне — в 1941 и 1975—1976 гг. Во время последнего — Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) — на поверхность поступило более 1 км³ базальтовой магмы (объемы лавы и пирокла-

стики пересчитаны на объемный вес магмы 2.7 г/см³), и образовалась самая молодая вершинная кальдера размером 1.3×1.6 км и глубиной 500 м. Это извержение входит в шестерку крупнейших трещинных извержений мира [1—3].

Продукты извержений Толбачика схожи с отложениями вулканов Гавайских о-вов, и для их классификации используется та же терминология, происходящая от языка аборигенов (которые когда-то съели капитана Кука). Тонкие, протяженные лавовые потоки с относительно гладкими поверхностями (часто причудливо изогнутые — кишечные, канатные и др.) носят название «пахойхой» (в переводе — «можно ходить голыми пятками»). Более толстые потоки с шлаковой занозистой мелкоглыбовой поверхностью красноречиво именуются «аа» — по ним даже в ботинках ходить невозможно. Длинные нити стекла, образующиеся при выбросах-выплесках жидкой лавы из озер, носят название «волосы Пеле» — в честь языческой богини вулканов. Пирокластика Толбачика представлена также легкими вулканическими шлаками (черным пузыристым базальтовым стеклом) и разнообразными по форме витыми бомбами (выброшенными взрывами и застывшими в полете кусками жидкой лавы).

Трещинные извержения маловязких базальтовых магм нетипичны для Камчатки. В исторический период еще только вулкан Горелый в середине XVIII в. произвел подобное извержение. Большинство же здешних вулканов извергают значительно более вязкие андезито-базальтовые и андезитовые магмы, характер извержений которых совершенно иной. Они более взрывные, выбрасывают много пирокластики и сопровождаются излиянием коротких толстых лавовых потоков с крупноглыбовой поверхностью или выжиманием крутосклонных лавовых куполов, которые, как пробки, запечатывают жерло вулкана.

Возможность увидеть на Камчатке извержение гавайского типа предоставляется нечасто, и долгосрочный прогноз активности Толбачика, казалось, оставлял на это мало шансов. Прогноз основывался на оценках продуктивности вулкана (среднего объема магмы, поступающей на по-

верхность в единицу времени). Считалось, что после крупного события 1975—1976 гг. Толбачику потребуется более 200 лет, чтобы в его питающей системе накопилось количество магмы, достаточное для нового значительного извержения [1, 3].

Извержение 2012—2013 гг.

Совершенно неожиданно рано утром 27 ноября 2012 г. сейсмостанции стали регистрировать под Толбачиком рой слабых землетрясений на глубинах менее 5 км. Развитие событий было столь стремительным, что вулканологи не успели дать предупреждение о приближающемся извержении. Эпицентры толчков быстро переместились на южный склон Плоского Толбачика, где вечером того же дня открылась трещина, и началось новое извержение (рис. 2).

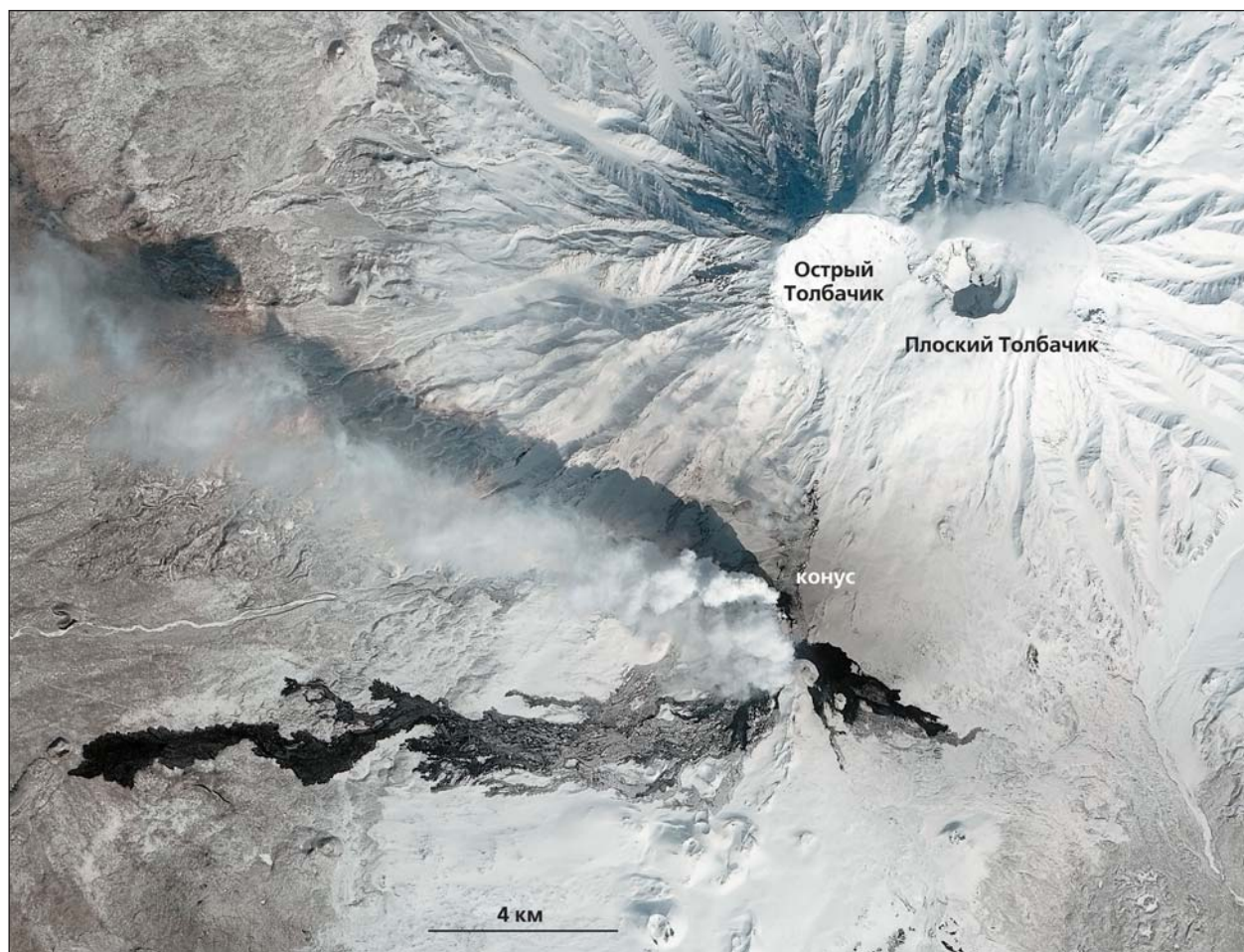


Рис.2. Толбачик 5 апреля 2013 г. В верхнем правом углу — сросшиеся конусы Острого и Плоского Толбачика. На вершине Плоского Толбачика хорошо видна кальдера 1975—1976 гг. Над активным шлаковым конусом Набоко поднимается облако вулканических газов, которое сносится ветром к северо-западу. К северу от конуса тонкая серая линия — верхний участок трещины, активной в первые дни нового извержения. К югу от конуса видны свежие лавовые потоки последнего извержения (более старые, припорошенные снегом выделяются серым, а самые последние — черным цветом).

Космический снимок со спутника «EO-1 ALI» (NASA), <http://earthobservatory.nasa.gov>

В первые дни извержения плохая погода не позволяла увидеть детали происходящего, и только 29 ноября облет места прорыва на вертолете показал, что радиальная трещина побочного прорыва состоит из двух участков (северного и южного) общей длиной 3,5 км, расположенных на высотах 1500—2000 м. Вдоль трещины образовались многочисленные небольшие шлаковые конусы, из которых фонтанировала и изливалась жидкая лава. Высота выбросов бомб достигала 200 м. Облако извержения поднималось на высоту нескольких километров, и выпавший пепел покрыл поверхность снега на расстоянии в 60 км. Лавовые потоки типа «аа» быстро двигались вниз по склону в южном и юго-западном направлениях. В 9 км от трещины они достигли верхней границы березово-лиственничного леса и, как гусеницы гигантского танка, начали проламывать просеки. Крутая фронтальная часть наступающей лавы имела вид широкой огненной стены высотой до 12 м. Вскоре лава перерезала единственную дорогу, ведущую к Плоскому Толбачику.

Вблизи подножия вулкана нет населенных пунктов, и извержение не представляло прямой угрозы. Ближайший поселок лесопромышленников Козыревск с населением около 2000 расположен в 40 км к северо-западу от места извержения. Здесь находится приемный пункт региональной сети телеметрических сейсмостанций с веб-камерой, направленной на вулкан Безымянный, которую с началом нового извержения переориентировали на Толбачик. Возможность наблюдать происходящее через Интернет получили все желающие. Это способствовало небывалому наплыву туристов, которые, несмотря на тридцатиградусные морозы (кто на вертолете, кто на снегоходе, а кто и на лыжах, в зависимости от толщины кошелька и личного мужества), стремились добраться до извергающейся лавы.

К 30 ноября на каждом участке образовавшейся трещины осталось по одному действующему шлаковому конусу, получивших имена известных советских вулканологов — А.А.Меняйлова и С.И.Набоко. 1 декабря вулканическая активность сосредоточилась на самом южном конце эруптивной трещины. Быстрое сокращение числа действующих жерл часто наблюдается при подобных извержениях: магма в узкой трещине быстро застывает, и извержение продолжается только на гипсометрически самом низком участке прорыва, где гидростатическое давление магмы максимально. В кратере продолжающего действовать подковообразного шлакового конуса Набоко непрерывно фонтанировало и плескалось небольшое лавовое озеро, выбрасывая ошметки жидкой лавы, легкий вулканический шлак и волосы Пеле. Быстрая огненная река лавы с расходом 30—50 м³/с вытекала из озера на склон вулкана (рис.3). Скорость течения лавы достигала 2—3 м/с, а температура, измеренная термопарой, составляла 1060—1080°C.

Первые порции изверженной лавы содержали 54% SiO₂, позднее его количество снизилось до 52%. К середине декабря длина потоков достигла 17 км. После этого увеличение протяженности потоков прекратилось, и формирующееся лавовое поле стало наращивать площадь и толщину. Это связано с тем, что предельная протяженность лавового потока определяется в основном величиной расхода лавы, который, как правило, максимален в начале извержения.

Казалось, что извержение должно скоро прекратиться, однако этого не случилось. В январе 2013 г. активность стала более ровной, сходной по характеру с Южным прорывом извержения 1976 г. [2]. Средняя высота выбросов вулканических бомб уменьшилась до 100 м. Лава перестала изливаться непосредственно из шлакового конуса, а начала вытекать через систему лавоводов — тоннелей в лавовом поле диаметром несколько метров и длиной 1—2 км. В их кровле образовалось несколько провалов — отдушин, из которых выходили раскаленные газы, а на глубине нескольких метров была видна быстротекущая лава (рис.4). Она выходила из тоннелей в виде протяженных лавовых рек глубиной 3—5 м (рис.5, 6)



Рис.3. Река расплавленного базальта с температурой более 1000°C. 25 января 2013 г.



Рис.4. Провал в кровле лавовода с текущей лавой. 19 марта 2013 г.



Рис.5. Выход лавового потока из основной лавовой трубы. 19 марта 2013 г.



Рис. 6. Лавовая река, выходящая из лавовода в 1 км от активного шлакового конуса. Вулканолог в теплоизолирующем костюме отбирает пробу базальтового расплава. 19 марта 2013 г.



Рис.7. Фронт активно движущегося лавового потока типа «аа». 18 марта 2013 г.



Рис.8. Канатная поверхность лавового потока типа «пахойхой». 8 апреля 2013 г.

и далее распространялась по склонам вулкана в виде потоков типа «аа» (рис.7). Лавовые реки часто тащили куски затвердевшего материала (обрушившейся кровли лавоводов, оторванные борта лавовых рек), которые иногда запруживали русло, что вызывало широкие разливы лавы, застывающей в форме «пахойхой» с канатной или кишечной поверхностями (рис.8).

На отдельных участках через поверхность и борта потоков «аа» медленно выдавливалась их внутренняя пластичная часть, принимая форму почти сферических подушек — так называемых тюбиковых лав. Рост подушек и продвижение потоков тюбиковой лавы происходит настолько медленно, что почти незаметно для человеческого глаза.

К концу мая, когда расход лавы уменьшился примерно до $15 \text{ м}^3/\text{с}$, тюбиковые выжимки стали преобладать над всеми остальными типами лавовых излияний и сформировали обширный покров в южном секторе лавового поля (рис.9).

В течение лета уровень лавы в лавоводах постепенно понижался, и к концу лета они полностью опустели. Лавовое озеро в кратере конуса Набоко исчезло. В эксплозивной активности кратера наблюдалось несколько пауз продолжительностью до трех дней. Многим казалось, что



Рис.9. Фронт тюбиковой и кишечной лавы в 3.5 км от активного конуса. 28 мая 2013 г.

извержение закончилось. Однако в момент написания статьи (начало сентября) слабые выбросы из двух жерл на дне кратера свидетельствовали, что побочный прорыв еще не прекратил свою деятельность.

Чем для науки интересно новое извержение?

Толбачик извергается уже более девяти месяцев. Объем излившейся лавы пока точно не определен, но, по предварительным оценкам, он составляет около 1 км³ лавы. На Земле извержения такого масштаба происходят нечасто, а для Камчатки это, безусловно, одно из самых значительных извержений за исторический период [4]. Крупно-объемные трещинные базальтовые излияния еще более редки. Они характерны для океанического вулканизма горячих точек — Исландии, Канарских и Гавайских о-вов, о.Реюньон. Но Камчатка — зона субдукции. Здесь абсолютно другая геотектоническая обстановка, и такие извержения для нее не типичны. Новое извержение Толбачика предоставляет исследователям редкую возможность детально проследить эволюцию

разнообразных геологических и геофизических параметров эруптивного процесса крупного трещинного базальтового извержения, происходящего в обстановке зоны субдукции. Для фундаментальной науки важно понять закономерности генерации, накопления, подъема и извержения больших объемов базальтовой магмы. С практической точки зрения, надо научиться предсказывать начало подобных извержений, прогнозировать их силу, объем и продолжительность, понять закономерности формирования обширных лавовых полей.

Длительность и относительно спокойный характер трещинных извержений позволяют организовать их систематическое комплексное изучение, дают возможность проводить прямые наблюдения разнообразных явлений, сопровождающих эруптивный процесс. Например, особенностью первого этапа нового извержения Толбачика было активное продвижение лавовых потоков по обширной местности, покрытой глубоким (до 2 м) снегом (рис.10). Считалось, что лава с температурой более 1000°C должна мгновенно растопить снег и вызвать образование протяженных лахаров (грязевых потоков вулканического происхождения). Ожидалось, что чем толще снеговой

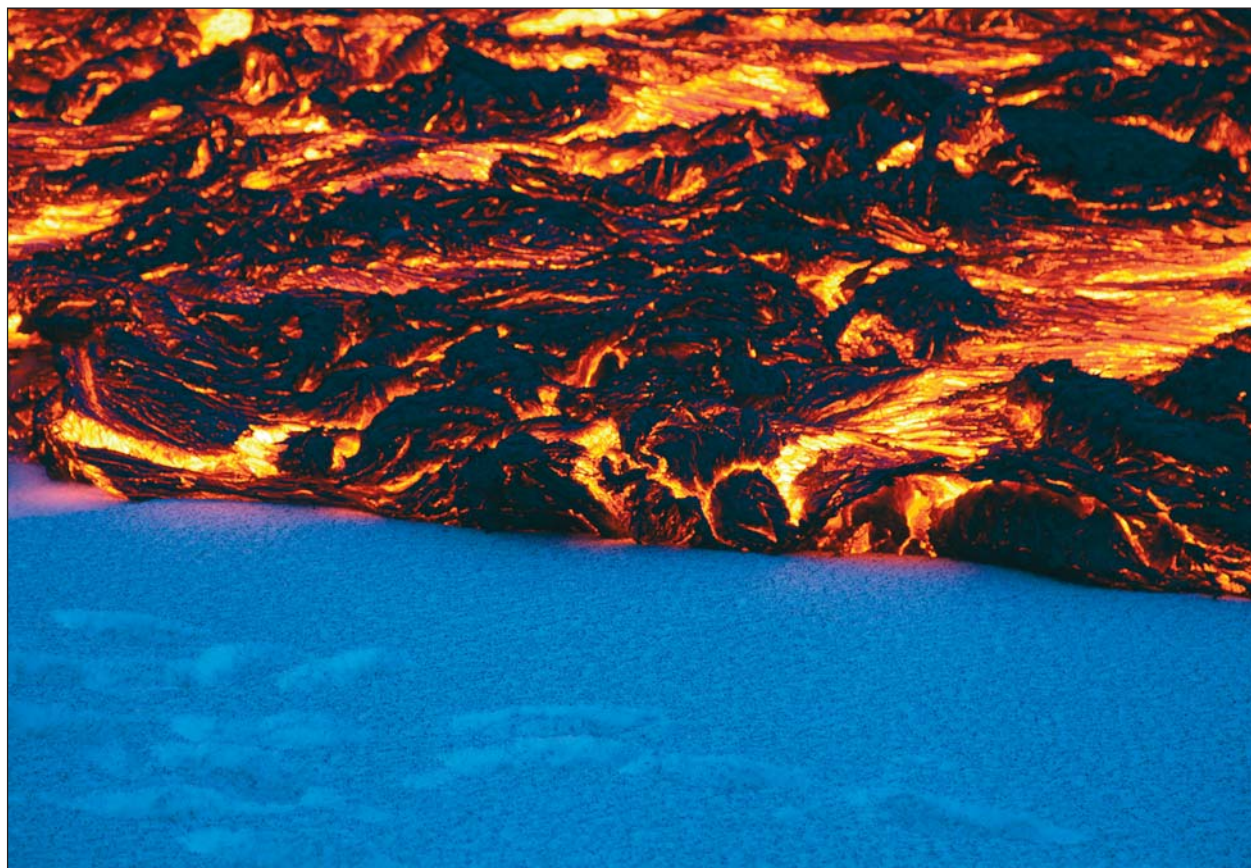


Рис.10. Поток жидкой лавы, быстро заливающий снег без какого-либо видимого взаимодействия. Светлые пятна на снегу — следы человека. 4 апреля 2013 г.

покров, тем мощнее будет лахар. Действительность же оказалась совершенно иной: грязевые потоки не образовались вовсе или были очень маленькими, протяженностью не более нескольких сотен метров. С удивлением мы наблюдали, как фронт лавового потока типа «аа», слегка похрустывая, медленно насыпается-наезжает на более чем метровый слой плотного снега, который ведет себя как обыкновенный песок. Конечно, через несколько часов или даже дней снег под лавовым потоком медленно таял, но внешне это почти никак не проявлялось. Оказалось, что передача тепловой энергии от лавы к снегу происходит очень медленно. И ее скорость недостаточна, чтобы быстро растопить снежный покров. Во-первых, снег белый и отражает большую часть теплового излучения. Во-вторых, шлаковатая поверхность глыб потоков типа «аа» имеет такую низкую теплопроводность, что снег даже при прямом контакте с «аа»-лавой тает очень медленно, и весь небольшой объем образующейся талой воды просто впитывается в грунт. Тюбиковые лавы ведут себя совершенно иначе. Они движутся чрезвычайно медленно (около метра в час) и не имеют теплоизолирующей шлаковатой поверхности. Снег перед фронтом их потока успевает частично растаять, частично испариться, и лава ползет под толстым снеговым покровом, приподнимая его в виде купола. Большие куски снега оказываются на поверхности потока, где постепенно тают. Талая во-

да просачивается вниз в толщу раскаленной массы, вскипает и испаряется. Это вызывает быструю закалку лавы с образованием гиалокластитов (раздробленных термическим шоком вулканических стекол).

«Гавайское» извержение Плоского Толбачика продолжают изучать сотрудники Института вулканологии и сейсмологии вместе с коллегами из других учреждений РАН и из Камчатского филиала Геофизической службы России [5]. Организовано почти непрерывное наблюдение динамики извержения, проводится регулярный отбор образцов изливающейся лавы для петрологических и геохимических исследований, несколько раз удалось отобрать пробы высокотемпературных (более 1000°C) вулканических газов. Проводятся сейсмологические и геодезические наблюдения. Два раза выполнялась площадная аэрофото- и инфракрасная съемка формирующегося лавового поля. Однако помимо объективных трудностей (сурового высокогорного климата, отсутствия источников питьевой воды) особенно серьезную проблему представляет недостаток финансирования. Сейчас, например, один час работы вертолета «МИ-8» на Камчатке стоит 160 тыс. руб., и до объекта исследования иногда просто невозможно добраться. Научные результаты, полученные в ходе предыдущего извержения Толбачика (1975—1976), стали классикой мировой вулканологии. Что даст науке нынешнее извержение? ■

Литература

1. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975—1976 гг., Камчатка) / Ред. С.А.Федотов, Г.Б.Флеров, А.М.Чирков. М., 1984.
2. Чирков А.М. Толбачинское извержение // Природа. 1976. №7. С.78—94.
3. Двигало В.Н., Федотов С.А., Чирков А.М. Вулкан Плоский Толбачик // Действующие вулканы Камчатки. Т.1 / Ред. С.А.Федотов, Ю.П.Масуренков. М., 1991. С.200—214.
4. Edwards B., Belousov A., Belousova M. et al. Another “Great Tolbachik” Eruption? // Eos. 2013. V.94. №21. P.189—191.
5. Самойленко С.Б., Мельников Д.В., Магуськин М.А., Овсянников А.А. Начало нового трещинного Толбачинского извержения в 2012 году // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2012. №2. С.20—22.

Новые штрихи к портрету В.И.Вернадского

По страницам неопубликованных писем В.И.Вернадского и П.П.Пилипенко

С Вашим отъездом за границу как-то рассеялась наша минералогическая семья, не стало объединяющего центра минералогической мысли...

Из письма П.П.Пилипенко В.И.Вернадскому
от 7 января 1926 г.

Г.В.Кузнецов,

доктор биологических наук

Институт проблем экологии и эволюции им.А.Н.Северцова РАН
Москва

В этом году исполнилось 150 лет со дня рождения Владимира Ивановича Вернадского, великого гражданина России, всемирно известного ученого и мыслителя*. Его юбилей ныне широко отмечает все мировое сообщество, недаром 2013-й по решению ЮНЕСКО назван *Годом Вернадского* в России и на Украине.

Благодарная память о гениальном соотечественнике всегда была жива в нашей стране. В 1988 г. в честь 125-летнего юбилея Вернадского состоялось торжественное заседание в Москве, в Большом театре Союза ССР. В нем участвовали руководители АН СССР, виднейшие советские и зарубежные ученые, ученики и последователи Владимира Ивановича. Один из выступавших докладчиков, директор Института геохимии и аналитической химии академик В.Л.Барсуков справедливо отметил, что, не впадая в преувеличение, Владимира Ивановича можно назвать Ломоносовым 20-го столетия.

По поводу празднования 150-летнего юбилея Вернадского вышел специальный указ Президента России В.В.Путина (№1206 от 21.08.2012 г.). Как в столице, так и в различных регионах страны проходят международные конференции, школы и конкурсы молодых ученых, а например ученые Томска совместно с администрацией в 2013 г. проводят городской образовательный проект «Развитие идей Владимира Ивановича Вернадского в научно-образовательном комплексе г.Томска».

Вклад ученого в сокровищницу мировой науки неоченим. Недаром в 1943 г., когда всенародно отмечалось 80-летие академика, награжденного

за свои заслуги Сталинской премией, известнейший химик академик Н.Д.Зелинский писал: «Вы для науки сделали так много, что я не могу взять на себя охарактеризовать широкое творчество трудов Ваших и их значение в едином познании природы» [1, с.55].

Владимир Иванович заслужил любовь и признание не только за свои научные достижения. Он являл собой образец истинного человеколюбца, чьи высокие нравственные начала позволили ему еще в далекой молодости вместе с друзьями создать духовное содружество «Братство», идеей которого было «помогать друг другу в бережении свободной человеческой личности как величайшей человеческой ценности» [2, с.38]. Основные лозунги «Братства» гласили: «Работай как можно больше; потребляй на себя как можно меньше; на чужие нужды смотри, как на свои...» [3, с.42]. Такая нравственная основа помогла Вернадскому стать выдающимся организатором науки и создать успешно работающие отечественные научные школы, в первую очередь блестящую школу минералогов-геохимиков в Московском университете.

Как известно, среди всех направлений разносторонней деятельности Владимира Ивановича ведущее место занимала минералогия, особенно в первый период его научной работы. По подсчету академика А.Е.Ферсмана, свыше 30% трудов, опубликованных Вернадским, относится именно к ней.

Владимир Иванович начал преподавать курс минералогии в Московском университете в возрасте 27 лет. В те годы эта наука была «сухой» описательной дисциплиной, чья задача лишь устанавливать физические свойства минералов. Молодой ученый коренным образом перестроил преподавание, выдвигая на первый план изучение естественной истории минералов, рассматривая минерал как продукт, возникший в резуль-

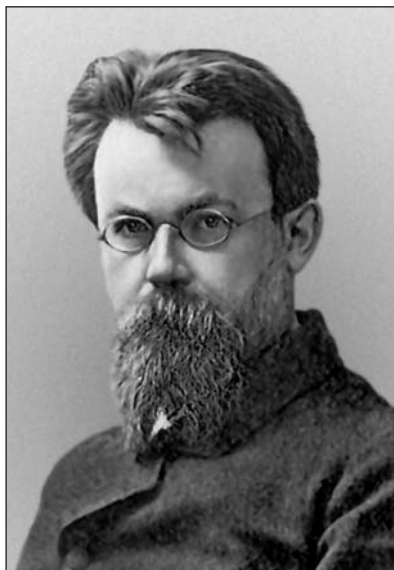
* См. подборку статей «Царство моих идей впереди». К 150-летию со дня рождения В.И.Вернадского (Природа. 2013. №3. С.33–73).

тате протекающих в земной коре природных химических реакций, и отдельно ввел курс кристаллографии. Так возникли истоки русской химической минералогии. Вернадскому мы обязаны тем, что впервые в университетском преподавании вводились систематические экскурсии для минералогических наблюдений горных пород в обнажениях и выработках. На лекциях Владимир Иванович умел увлечь слушателей своим предметом. Одна из его учениц на Женских курсах сообщала: «Мы ждали его лекций, как праздника. Они оживили мертвую природу. Камни заговорили» [3, с.65].

Талантливая молодежь, прежде всего, студенты стали охотно работать в минералогическом кружке, организованном Владимиром Ивановичем при университете. Одним из его учеников, активных участников кружка, был Павел Прокопьевич Пилипенко (1877—1940). С начала своего научного пути и до самого конца его Вернадский видел в учениках товарищей по работе, старался помочь им не только в науке, но и в жизни. Именно такие отношения сложились у него и с Пилипенко, в судьбе которого он принял горячее участие, подтверждением этого служат сохранившиеся письма.

Сын Павла Прокопьевича, Александр Павлович Пилипенко, мой отчим. В нашей семье сохранилось, к сожалению, всего семь писем Вернадского, отправленных Павлу Прокопьевичу в период с 1907 по 1932 г. Жена Павла Прокопьевича, Лидия Федоровна, пережившая мужа на 36 лет, передала мне еще и письмо, и открытку, адресованные Владимиром Ивановичем ей уже после кончины супруга в 1940 г., и несколько листочков своих воспоминаний.

Павел Пилипенко, родившийся в крестьянской семье в деревне Барановка на Украине, с детства отличался большой тягой к учению, настойчивостью и трудолюбием. Это позволило ему добиться успехов в учебе. После окончания двухклассного училища Министерства народного образования он поступил в Александровскую гимназию г. Старобельска, которую окончил с золотой медалью в 1897 г. Тогда же поступил на естественное отделение физико-математического факультета Московского университета и окончил его в 1902 г. с дипломом 1-й степени. Владимир Иванович оценил способности своего ученика и оставил его сверхштатным ассистентом при кафедре минералогии для подготовки к профессорскому званию. Но остаться в Москве не



Владимир Иванович Вернадский.



Павел Прокопьевич Пилипенко.
1939 г.

удалось из-за незавидного материального положения, ведь работа в университете на сверхштатной должности практически не оплачивалась, а в Томске Пилипенко предложили штатную должность.

1 января 1903 г. по приглашению профессора А.М.Зайцева* Павел Прокопьевич стал ассистентом и хранителем Минералогического музея Томского университета.

С первых дней работы в университете он приводил в порядок минералогические коллекции, одновременно участвовал в многочисленных экспедициях по исследованию полезных ископаемых Алтая и Западной Сибири и значительно пополнил экспонатами коллекцию минералогического кабинета. Сам делал химические анализы собранного материала, написал ряд обобщающих статей, а также занимался научными исследованиями, связанными с падением метеорита «Телутское озеро» в 1904 г. Напряженная работа в условиях сурового сибирского климата подорвала здоровье Пилипенко. Началось с сухого плеврита и кончилось, как думали, чахоткой. В тяжелейшем

* Алексей Михайлович Зайцев (1856—1921) — выпускник физико-математического факультета Казанского университета, доктор минералогии и геологии, был профессором кафедры геологии и минералогии Томского университета (1896—1907), а с 1901 г. по настоянию В.А.Обручева заведовал по совместительству также кафедрой минералогии Томского технологического института. Большой знаток геологии Сибири, особое внимание уделял поискам золота и прекрасно изучил его месторождения в Мариинской и Енисейской тайге. В 1907 г. по выслуге лет уехал из Томска в Варшаву, где до выхода на пенсию (1916) занимал должность профессора на кафедре минералогии и геологии Варшавского университета.



Конверт первого сохранившегося письма В.И.Вернадского.

состоянии Павел Прокопьевич был отправлен в Москву по настоянию Владимира Ивановича, с которым он поддерживал постоянную связь. Как вспоминает Лидия Федоровна, коллеги Пилипенко в Томске не верили в его выздоровление и «даже написали некролог после его отъезда, считая, что он уехал умирать. <...> Можно сказать, что Владимир Иванович спас ему жизнь». Сначала он поместил больного в «Пропедевтическую клинику Императорского Московского университета». Там Пилипенко успешно лечили почти три месяца: с 15 ноября 1906 г. до 3 февраля 1907 г. Потом Владимир Иванович, по воспоминаниям Л.Ф.Пилипенко, «выхлопотал средства и отправил его лечиться за границу». Почти год Павел Прокопьевич лечился в Швейцарии, Италии и, наконец, в Германии, а затем опять уехал работать в Томский университет.

Первое из сохранившихся у нас писем Вернадского направлено из Ялты. На открытке рукой Владимира Ивановича написано:

19 сентября 1907 г.

В г.Томск в минералогический кабинет Университета, его высокоородию Павлу Прокопьевичу Пилипенко.*

Многоуважаемый Павел Прокопьевич! Очень рад слышать, что вы поедете в Москву выдерживать экзамен на магистра. Вы, по уставу, имеете право быть приват-доцентом в университете после двух пробных лекций. И мне кажется, что Вам следовало бы воспользоваться им — читать лекции медикам. Могу написать на факультет. Во-первых, это будет зачтено Вам в преп[одавательскую] службу, а, во-вторых, практика. Со своей стороны, если понадобится, могу написать...

* В письмах сохранена орфография автора. Отчество Павла Прокопьевича Вернадский писал как *Прокопьевич*. Здесь и далее в письмах многоточием обозначены неразборчиво написанные слова. Неоценимую помощь в подготовке писем для публикации оказала моя жена, Татьяна Николаевна Филатова, которой выражаю искреннюю благодарность.

*П.П.Орлов** также поддержит, да и др. Напишите мне потому о Ваших планах. А как вопрос о ремонте кафедры, что слышно на факультете.*

Ваш В.Вернадский

Поражает уважительное обращение Вернадского к молодому ученому, крестьянскому сыну: «его высокородие» и «многоуважаемый»! Такое обращение присутствует только в этом первом письме, потом, когда Павел Прокопьевич станет профессором, Вернадский будет обращаться к нему как к коллеге: на конвертах значится «профессору», а обращение начинается со слова «дорогой».

Павел Прокопьевич прислушался к советам своего учителя: сдал магистерский экзамен и при прочтении пробных лекций в 1908 г. получил звание приват-доцента. В том же году был зачислен на эту должность в Томском университете и стал читать там курс минералогии и геологии, а в 1913 г. — и на естественном отделении Сибирских высших женских курсов.

Работая в Томском университете, он оправдал возлагавшиеся на него надежды своего великого учителя. Выполнил большую работу по изучению минералов Алтая, Забайкалья и Минусинского края, установил закономерности распределения рудных полей в пределах Алтая, впервые высказал новые важные идеи об образовании, составе и строении пегматитов, о процессах оледенения Алтая и т.д. Материалы этих исследований легли в основу блестящего для своего времени труда «Минералогия Западного Алтая», который в феврале 1915 г. Пилипенко защитил в Петроградском университете в качестве диссертации на степень магистра минералогии и геогнозии. В предисловии Павел Прокопьевич выразил сердечную признательность дорогому учителю за советы, теплое участие и постоянную готовность оказать возможную помощь. За этот труд он был удостоен академической Большой премии им.Ахматова.

Вернадский гордился достижениями своего ученика и, рекомендуя его в 1915 г. на должность профессора, заведующего кафедрой минералогии Саратовского университета, назвал «одним из выдающихся... университетских преподавателей минералогии в России» [4].

Вернадский отправил Павлу Прокопьевичу небольшую открытку в Саратовский университет накануне своего отъезда во Францию, в Сорбонну, где он пробыл до 1927 г. — почти три с половиной го-

** Петр Павлович Орлов (1859—1937) — химик, выпускник Московского университета, приват-доцент (1901), профессор (с 1906 г.) Томского университета, где в 1922 и 1923 гг. впервые в России читал спецкурс «Радиоактивные элементы». В 1911 г. участвовал в экспедиции на Алтай с Пилипенко. Вернадский в 1914 г. представлял работы Орлова по определению радиоактивности водных источников на заседании Физико-математического отделения Академии наук. На пенсии (с 1926 г.) в Ярославле продолжал научную работу вплоть до своей кончины.

да. Как видно из этого короткого сообщения, Владимир Иванович заботился о том, чтобы не прерывалась тесная связь с одним из любимых учеников.

10 июня 1922 г.

Профессору Павлу Прокофьевичу Пилипенко. Университет. Минералогический кабинет.

Дорогой Павел Прокофьевич! Пишу Вам несколько слов перед отъездом на 5 месяцев за границу, в Париж, где я выбран профессором Сорбонны для прочтения специального курса (должно б[ыть] по геохимии). Хочу там закончить свою работу по живому веществу... Связан также с делами по Ra [радио]... Очень хочу иметь о Вас информацию. Если трудно написать за границу, напишите Елизавете Дмитриевне Ревуцкой в Петроград — она мне перешлет.*

Ваш В.Вернадский. Еду с женой и дочерью.

Такая научная и человеческая связь постоянно поддерживалась, несмотря на большие трудности с зарубежной перепиской. Об этом свидетельствуют два сохранившихся письма: Пилипенко к Вернадскому от 7 января 1926 г. и Вернадского Пилипенко от 3 декабря 1927 г. Павел Прокопьевич писал Владимиру Ивановичу из Саратовского университета. Приводим почти полностью первое письмо.

7 января 1926 г.

Дорогой Владимир Иванович!

...Пишу Вам заказным, не имея уверенности, дойдет ли до Вас мое письмо. На бандеролях, полученных мной от Вас из Парижа с вложением Вашей «Геохимии» и 2-х оттисков на французском языке, за которые я Вам очень благодарен, Вашего адреса я точно не разобрал, поэтому посылаю на университет в надежде, что Вы, наконец, получите мое письмо.

Жизнь у меня лично начала постепенно налаживаться. С 23-4 [1923—1924] гг. явилась возможность научно работать, газ и вода, электричество идут почти без перебоев, испытываю острый недостаток в приборах... но как-то устраиваюсь, пользуясь любезной помощью здешних лабораторий.

Недавно отдал в печать статью о глауконите с г.Лакой у Саратова; пришел к выводу, что «глауконит» есть механическая смесь опала и люссатита, проросших по микроскопическим трещинам и капиллярам каким-то третьим минералом зеленоватого цвета, состоящим из окислов Feⁱⁱⁱ, Al,

Ca, Mg, K, Na. Дело в том, что после обработки глауконита крепкой HCl на водяной бане остается водная кремнекислота, состоящая из округлых зернышек опала и люссатита (уд. вес = 2,1, твердость = 5—6, воды 7—10%), в растворе кремнекислоты нет, а есть только опал Fe, Al и etc. Каковы отношения между выделенной кремнекислотой и остальными окислами с одной стороны, и каковы химические отношения между окислами Fe etc друг к другу — для меня остается загадкой. Как Вы думаете? К сожалению, в Саратове нет никакой минералогической литературы, страшно неудачно. Глаукониты из некоторых других пунктов Саратовск[ого] края дали такие же соотношения.

Кроме того, закончил обработку некоторых сульфатов из... глин г.Соколовой у Саратова. Один из них несомненно паралюминит, но имеет уд. вес около 2, его колич[ественный] анализ показывает приблизительные соотношения SO₃ : Al₂O₃ : H₂O = 1 : 1 : 8, а не 1 : 1 : 9, как у алюминита. Не знаю, есть ли это... изменения алюминита или может быть и паралюминита? На той же Соколовой горе есть и еще какие-то ближе пока не анализированные своеобразные продукты воздействия сернокислых и углекислых растворов... Я рад, что за последние 1/2 года явилась хоть небольшая возможность вести научн[ую] работу.

*Сильно задерживает очень слабое оборудование Минералогической лаборатории и почти полное отсутствие минералогической литературы. На днях получил от проф. Н.Н.Смирнова** из Москвы письмо, в котором он по поручению минералогической предметной комиссии предлагает мне подать на конкурс для замещения должности профессора минералогии, оставшейся вакантной после смерти дорогого Якова Владимировича***. Не знаю, подавать ли мне или*

** Николай Николаевич Смирнов (1885—1972) — геолог, минералог, петрограф, заведовал кафедрой петрографии Московского университета (1918—1930), профессор кафедры минералогии и геологии Московского института силикатов и стройматериалов (1930—1934), профессор Московского химико-технологического института им.Д.И.Менделеева (с 1934 г.). С 1942 г. по совместительству возобновил преподавание в Московском университете в должности профессора на кафедре петрографии геологического факультета, заслуженный деятель науки РСФСР (1947). Опубликовал более 40 научных работ по вопросам региональной петрографии, рудным месторождениям Урала и др.

*** Яков Владимирович Самойлов (1870—1925), по рождению — Филиппович, но изменил отчество в честь своего крестного отца Вернадского. Выпускник Новороссийского университета (1893), профессор Московского сельскохозяйственного института (с 1906 г.), где создал минералогический музей агрономических руд. Одновременно приват-доцент (1907—1911), профессор Московского университета (1917—1925). Известный минералог, сначала ученик, а потом один из ближайших сотрудников Вернадского. Основатель систематического исследования фосфоритовых залежей в России, внес значительный вклад в становление биогеохимии как науки.

* Елизавета Дмитриевна Ревуцкая (1866—1942) — минералог, ученица Вернадского, его ассистентка на Высших женских курсах (с 1897 г.), сотрудник Минералогического музея Академии наук (с 1912 г.), затем старший радиолог Радиевого института. Фактически выполняла роль референта Вернадского. Помимо работы в музее Елизавета Дмитриевна совершала длительные поездки для сбора новых экспонатов, преимущественно на Урал (Ильменские горы) и в Крым. Умерла в блокаду Ленинграда.

же нет, будут ли там теперь условия, благоприятные для научной работы. Я был бы Вам очень признателен, дорогой Владимир Иванович, если бы Вы мне сообщили Ваше мнение по этому поводу. Крепко жму Вашу руку.

Ваш П.Пилипенко.

P.S. Вы, вероятно, уже знаете о том, что в ночь на 25 января, как мне сообщил Смирнов, скончался от злокачественной опухоли Юрий Викторович Вульф*.

С Вашим отъездом за границу как-то рассеялась наша минералогическая семья, не стало объединяющего центра минералогической мысли, все работают в разбивку.

Зная о трудностях с научной литературой, Вернадский использует любую возможность помочь в этом. Из письма узнаем, с какими сложностями столкнулся ученик Владимира Ивановича в те годы, если за благо считает, что в университете есть хотя бы вода и электричество. Но Пилипенко оказался достойным своего учителя: создал минералогическую лабораторию и минералогический музей при Саратовском университете, «явился организатором изучения минеральных богатств края: горючих сланцев, радиоактивности вод естественных источников, глауконита — широко распространенного в меловых отложениях Саратовского Поволжья и связанных с ним лития, рубидия и бора. Организовал экскурсию на места падения метеоритов на ст.Летяжевка Юго-Восточной ж[елезной] д[ороги], на ст.Шунка, на оз.Эльтон» [4].

Вернадский в своем письме, прежде всего, просит Пилипенко помочь ученикам Самойлова, одного из членов «минералогической семьи». Он посылает оттиск своего доклада о рассеянии элементов и, несмотря на то что «поглощен живым веществом», обсуждает результаты собственных расчетов по структуре кристаллических решеток и последние минералогические новости.

12 февраля 1927 г.

Дорогой Павел Прокофьевич!

Все еще не могу выехать — надеюсь все же выехать в ближайшее время, если не в Прагу, то в Германию. <...> Как Ваши дела? Пишу Вам для того, чтобы просить Вас помочь устроить [на]

* Юрий Викторович Вульф (1863—1925) — известный кристаллограф и популяризатор кристаллографии. Выпускник (1885), позже профессор (1897—1908) Варшавского университета, заведовал там кафедрой минералогии. В 1906 г. по приглашению Вернадского занял должность приват-доцента на кафедре минералогии Московского университета, в 1911 г. подал в отставку из-за разгрома университета министром просвещения Л.А.Кассо. В 1918 г. вернулся в университет и создал рентгеновский кабинет для исследования структуры кристаллов. Член-корреспондент АН СССР (1921). Основатель рентгеноструктурного анализа и основатель кристаллофизики в России, автор около 150 научных работ.

работу в Минер[алогический] Инст[итут] Москов[ского] Университета учеников Самойлова — М.В.Кленову** и Л.В.Пустовалова***. Сейчас они остались там как чужаки, их официальная связь с Институтом кончилась и, по-видимому, у них там трения и их хотят оттуда выпроводить (или это так им кажется). По-видимому, их там не любят (и может быть, они в этом не без вины) — но они работники хорошие и интересные и ближайшие сотрудники Самойлова. Надо их поддержать и как-нибудь их прикомандировать к Минер[алогическому] Институту. <...> Я готов со своей стороны всячески этому содействовать, тем более, что М.В.Кленова работает под моим руководством, и работает хорошо. Ее доклад был хороший — доклад Пустовалова был неудачный, но его доклад в Киеве... был хороший. Кто не делал ложных шагов.

В каком вообще положении Ваше дело в Москве?. Все-таки сейчас Вам надо быть ближе к центру. Посылаю Вам мою речь о рассеянии элементов; мне пришлось повторить ее в Академии, т.к. неожиданно заболел Д.И.Коновалов****, который должен был говорить речь, и было положение довольно безвыходное. Жена перевела ее по-французски, и я посылаю ее в *Revue gener. Des Sc.* [*Revue générale des*

** Мария Васильевна Кленова (1898—1976) — выпускница Московского университета (1924), доктор геолого-минералогических наук (1937), профессор. В начале 30-х годов — научный сотрудник Плавучего морского научного института, заведующая лабораторией (1938) Всесоюзного НИИ рыбного хозяйства и океанографии, с 1955 г. и до конца жизни — заведующая лабораторией в Институте океанологии АН СССР, лауреат премии им.Н.М.Губкина (1962). Участница многих морских экспедиций: на Каспий, в Арктику (на Новую Землю, Шпицберген, Землю Франца-Иосифа), принимала участие в Первой антарктической экспедиции. Основательница отечественной школы морской геологии.

*** Леонид Васильевич Пустовалов (1902—1970) — выпускник Московского университета (1924), ученик Самойлова, геолог, минералог, петрограф. Заведовал кафедрой минералогии и кристаллографии Московского нефтяного института (1934—1962) и отделом петрографии осадочных пород в Институте геологических наук АН СССР (1943—1953), член-корреспондент АН СССР (1953). В 1961 г. организовал Лабораторию осадочных полезных ископаемых (ЛОПИ), которой руководил до 1970 г. Основные труды посвящены петрографии и геохимии осадочных пород. Монография «Петрография осадочных пород» (1940), получившая Сталинскую премию в 1941 г., послужила толчком к развитию исследований в области осадочных полезных ископаемых. Пустовалов резко выступал против идеи Вернадского о существенной роли живого вещества в геологических процессах.

**** Дмитрий Петрович Коновалов (1856—1929) — выдающийся химик, оказавший огромное влияние на развитие химической науки и становление химической промышленности России, один из основоположников учения о растворах, о химической термодинамике, общественный и государственный деятель, действительный член АН СССР (1923).

sciences], любопытный вывод — есть предел количеству атомов, могущих помещаться в кристаллической решетке в 1^{cc} [в 1 см^3]. Это аналог числа Лошмидта. Но есть ли одно и то же число при определенных условиях всей пространственной решетки? Любопытно, что никогда не может быть молекул или пространственных решеток, содержащих по весу более 25% водорода. Отчего? — если, конечно, исключить H_2 твердый. Скачок мне представляется здесь совсем особым. Надо бы засесть за это — а я все поглощен живым веществом.

Уже кончена моя «Ист[ория] Минер[алогии]»... сданы в Госуд[дарственное] Издат[ельство] все мои «Геохим[ические] очерки» — но я все еще не приступаю к окончательной оценке воды. Мне хочется дать маленькие заметки. Мне кажется, Ненадкевич* под именем урановой руды описал новый минерал (ненадкевичум) — и он объяснил мне... псевдоморфность юрита. А затем я пересчитал эффект Rb [рубидия] — по моим, а не Ключковским** расчетам; общий тепловой эффект повторяется на 1%, а м[ожет] б[ыть], и больше.

Ваш В.Вернадский

В 1927 г. Пилипенко покидает налаженную работу в Саратовском университете и выезжает в Москву: по рекомендации Вернадского и Ферсмана он избран профессором кафедры минералогии Московского университета. Это было связано с невосполнимыми утратами, которые неожиданно постигли кафедру минералогии Московского университета: смертью двух выдающихся ученых — кристаллографа Юрия Викторовича Вульфа, основоположника рентгеноструктурного анализа, и минералога Я.В.Самойлова, одного из самых способных учеников Вернадского. Пилипенко застал положение дел на кафедре в очень плачевном состоянии, о чем, видимо, сообщил своему учителю. Вернадский в нижеприведенном письме, понимая, что положение действительно тяжелое, полон веры в научный и организаторский талант своего ученика.

* Константин Автономович Ненадкевич (1880—1963) — минералог и геохимик, выпускник Московского университета (1902), один из любимых учеников Вернадского. С 1906 г. работал в различных геологических учреждениях Академии наук (Минералогическом музее, Геологическом институте, Институте минералогии и геохимии редких элементов). Член-корреспондент АН СССР (1946), лауреат Сталинской премии (1948). Основные труды посвящены исследованию новых видов минерального сырья, разработке способов извлечения редких металлов из руд и др. Разработал (1916—1920) технологию выплавки металлического висмута, по которой в СССР была получена его первая опытная партия. В 1926 г. определил химическим путем возраст одного из минералов — уранинита. В его честь назван минерал ненадкевит.

** В.М.Ключковский — автор эмпирического правила, описывающего энергетическое распределение орбиталей в многоэлектронных атомах.

4 ноября 1927 г.

Дорогой Павел Прокофьевич!

Тяжелую картину Вы мне нарисовали — нельзя закрывать глаза на то, что Минер[алогический] кабинет вынес удар 1911 года***, затем революция и разруха и, наконец, смерть таких выдающихся ученых, как Самойлов и Вульф. А затем сейчас плохая оплата труда... вызывает совместительство — а нищенские средства, отпускаемые на научную работу, еще больше расширяют учреждение. Я страшно рад, что Вы стали во главе нашего института, и уверен, что Вы двинете его по настоящему пути, несмотря на все окружающие тяжелые для научного труда условия жизни.

Первым делом Вам необходимо добиваться заграничной командировки. Вы непременно должны навестить новые минералогические институты (Осло в Норвегии, Лейпциг и Берлин (Политехнич[еский] Инст[итут] и И... Инст[итут]), Прагу и Брно). Начните сразу хлопоты. Хотя в М[инералогическом] И[нституте] есть рентгеновская установка — но она не связана точно с Институтом — а... сейчас нельзя преподавать минералогию, не введя рентгеновскую работу в виде текущей работы Института.

Я очень рад, если вы прочтете и курс геохимии. Я подготавливаю ряд лекций по геохимии металлов, которые прочту в Чехословакии, куда хочу поехать в январе и феврале и затем хочу повторить курс здесь. Множество сейчас интереснейших проблем не только может быть указано — но ко многим можно подойти очень близко. Факты есть, но они не собраны и не вошли в круг наших знаний...

...Очень советую Вам непосредственно списаться с А.Е.[Ферсманом] и с Серг[еем] Мих[айловичем] Курбатовым****. Что есть у меня из оттисков — очень немного и больше старых — вышло. Всего лучшего.

Ваш В.Вернадский.

*** В знак протеста против удаления министром Кассо ректора университета целый ряд профессоров, в том числе Вернадский, покинули университет.

**** Сергей Михайлович Курбатов (1882—1962) — минералог. Окончил Санкт-Петербургский университет (1905), преподавал минералогию на Высших женских курсах и в Петербургском технологическом институте (1907—1918). По рекомендации Вернадского избран исполняющим обязанности экстраординарного профессора и заведующего кафедрой минералогии и геологии Томского университета (1918). Заведующий минералогического отдела и директор Государственного НИИ керамического института (1922—1930), заведующий минералогическим сектором Ломоносовского института минералогии и геохимии АН СССР (1930—1935), профессор и заведующий кафедрой минералогии Ленинградского университета (1925—1962). В 1945—1951 гг. исполнял обязанности заведующего минералогическим отделом Кольской базы АН СССР. Выдвинул и разработал идеи об особенностях процесса минералообразования в гидротермальных условиях.

Следующее небольшое сообщение направлено Вернадским уже в Сибирь, на юг Иркутской обл. Его неутомимый ученик, проработав всего несколько месяцев в МГУ, уже организует большую минералогическую экспедицию для исследования Слюдянского флагопитового месторождения. Позже именем Павла Пилипенко, отдавшего много сил и энергии разведке, отработке и исследованию генезиса флагопитовых пород, названа одна из копей в окрестностях Слюдянки.

1 июля 1928 г.

Дорогой Павел Прокофьевич!

Сегодня уезжаю в Ессентуки (Ессентуки, Кисловодская 14, Санат[орий] Бальнеолог[ического] Института) и опять не застаю Вас, проезжая через Москву.

Из Ессентуков проеду на месяц в Киев, где идут работы по живому веществу. Очень буду рад получить от Вас весточку из Слюдянки. <...>

Ваш В.Вернадский.

Владимир Иванович, не забывавший постоянно интересоваться делами Пилипенко, находил время для собственных минералогических опытов, разгадывая с другим своим учеником, Ненадкевичем, строение каолина. Об этом свидетельствует письмо, в котором он просит Павла Прокопьевича прислать «хороших каолинов» и приводит выведенные им химические формулы «каолинового ядра». Работы по «каолиновому ядру» стали продолжением его опытов по «слюдяному кольцу». На основе последних Вернадский создал новую теорию строения ряда силикатов, которую высоко оценил французский ученый А.Л.Ле Шателье, назвав ее гениальной. Значение этой теории в науке сохранилось до сих пор. Трудно представить, как Вернадский мог сочетать такой необъятный фронт работ: именно тогда в руководимом им Радиевом институте строился первый в стране циклотрон; создавалась и биогеохимическая лаборатория, директором которой он был назначен. В эти же годы он разрабатывал еще и проблемы космического характера.

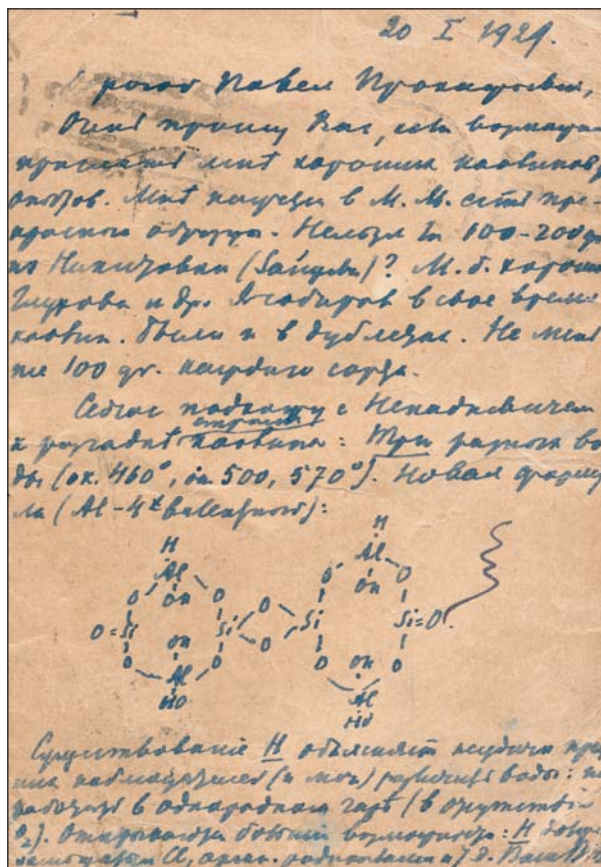
20 января 1929 г.

Дорогой Павел Прокофьевич!

Очень прошу Вас, если возможно, прислать мне хороших каолинов для опытов. Мне кажется в М[инералогическом] М[узее] есть прекрасные образцы. Нельзя ли 100 — 200 г. из Никитовки (Зайцева*). М[ожет] б[ыть] хорошие [из] Глухова** и др. Я собирал в свое время каолин. Были и в дублетах. Не меньше 100 гр[ам] каждого сорта.

* Вероятно имеется в виду коллекция профессора А.М.Зайцева.

** Вероятно имеется в виду г.Глухов в Черниговской обл. (Украина), знаменитый тем, что там добывалась фарфоровая глина, или каолин.



Письмо В.И.Вернадского от 20 января 1929 г., в котором дана химическая формула минерала с четырехвалентным алюминием.

Сейчас подхожу с Ненадкевичем к разгадке строения каолина: три разных [температурах] воды (ок. 460°, ок. 500°, 570°). Новая формула (Al четырехвалентного).

Существование H*** объясняет неудачи прошлых наблюдателей (и мои) различить воды: на водород в однородном газе (в отсутствие O₂). Открываются большие возможности: H... замещается Cl, органическими радикалами и т. д.

Ваш В.Вернадский

Последнее письмо Вернадский отправил Пилипенко в Москву в 1932 г. Павел Прокопьевич уже не профессор кафедры минералогии МГУ, так как решением правительства Минералогический институт при МГУ был разгромлен и в 1930 г. преобразован в самостоятельный Московский геологоразведочный институт (МГРИ). В своей записке, направленной в АН СССР, Вернадский расценивает это преобразование «как новый удар по преподаванию минералогии и научной работе».

*** Знак водорода H в тексте письма подчеркнут, вероятно, чтобы выделить его важную роль в написанной формуле, как следует из текста.

в этой области в нашей стране... это был живой, растущий центр научной работы, самый значительный в высшей школе нашей страны» [5]. Павлу Прокопьевичу, назначенному теперь на должность заведующего кафедрой минералогии и кристаллографии МГРИ, пришлось новыми тяжкими усилиями выправлять положение — в отсутствие приборов, на одном энтузиазме решать поставленные задачи.

Вернадский просит Пилипенко принять участие в экспедиции на Челекен: «Я устраиваю научное исследование Челекена в расчете на Вашу помощь... Я убежден, что исследование Челекена минералогически чрезвычайно ценно и несомненно даст большие результаты». Челекен — это бывший остров в Туркмении, который из-за понижения уровня Каспия превратился в полуостров в 30-х гг. XX в. Вернадский заинтересовался им еще в 1902 г., когда редактировал статью А.О.Шкляревского* о кристаллических формах серы с о.Челекен. Предвидение Вернадского о минералогической ценности Челекена полностью подтвердилось. Проведенные в Советском Союзе обширные геологоразведочные исследования обнаружили огромные ископаемые богатства полуострова. Сейчас эта территория не принадлежит России, добыча здесь нефти ведется зарубежными компаниями и переходит отметку 10–15 млн т в год.

25–28 апреля 1932 г.

Дорогой Павел Прокопьевич!

В ближайшие дни уезжаю за границу — наконец получил паспорта: теперь остались только виза и деньги — дело в ходу и я надеюсь выехать.

Помимо участия в радиоакт[ивной] конференции в Мюнстере, лекции в Сорбонне, в Париже и в Геттингене — я все время хочу употребить на подготовку книги о геохим[ической] энергии жив[ого] вещества.

Не окончил писать и продолжаю.

Я устраиваю научное исследование Челекена в расчете на Вашу помощь. Ваша поездка туда осенью для минералогического очерка Челекена внесена, и деньги получены. Мы рассчитываем на Вас и на помощника-сборщика. Я очень хочу, чтобы два наших аспиранта поработали под Вашим руководством — они аспиранты на геохимическом отделении Радиевого Института. Я убежден, что исследование Челекена минералогически чрезвычайно ценно и несомненно даст большие результаты.

* Анатолий Орестович Шкляревский (1869—1902) — рано ушедший из жизни ученик Вернадского, один из первых его выпускников, а впоследствии и ассистент. Владимир Иванович очень ценил своего преданного ученика и глубоко сожалел, что «преждевременная смерть поразила его в самом начале его научной деятельности, полной глубокого интереса и широких планов научной работы» [6].

*Спишитесь с Витал[ием] Григорьевичем Хлопиным**, остающимся директором Радиевого Института вместо меня и организующим всю работу (Ленинград, Петроградская сторона, ул. Рентгена 1, Госуд[арственный] Радиевый Институт).*

Посылаю Вам свою статью о воде. Очень мне хотелось бы иметь о ней Ваш отзыв. На всякий случай даю Вам мой постоянный адрес (адрес моей дочери Прага, Чехословакия... Vernadská, для меня).

Ваш В.Вернадский.

Сердечный привет Вашим. Ваш брат хотел справиться о могиле в Харькове моего брата Николая (умер в 1874). Справочное кладбище не нашло могилы: около церкви, мраморный белый саркофаг, при входе из главных ворот на кладбище налево по главной аллее, около (не доходя церкви) — среди могил.

Лидия Федоровна Пилипенко вспоминает, что Вернадский, будучи как-то у них в гостях, познакомился с братом Павла Прокопьевича и его семьей, проживавшими на Украине, в Харькове. Недалеко от тех мест был похоронен старший брат Владимира Ивановича, Николай, умерший совсем молодым. Владимир Иванович просил родных Павла Прокопьевича справиться о могиле своего горячо любимого брата и написать ему в Ленинград.

В 1934—1935 гг. по решению правительства все академические учреждения были переведены в Москву, куда пришлось переехать и Вернадскому, переписку, по-видимому, заменили частые личные встречи. Лидия Федоровна вспоминает, что Владимир Иванович по пути в МГРИ «заглядывал к нам, познакомился с тремя нашими малолетними сыновьями, сочувствовал мне, что трудно, должно быть, растить сыновей в наши времена. Как-то он задумался на минуту и сказал, что советует приобрести швейную машинку, ведь так много надо шить и штопать... Меня поразили его слова, действительно, в те времена нельзя было ничего купить, все делали сами, даже детские туфли... Владимир Иванович всегда был очень занят, дорожил своим временем. Я вспоминаю два таких случая: он должен был далеко ехать на машине и пригласил Павла Прокопьевича ехать вместе, чтобы дорогой спокойно поговорить о минералогических делах».

3 февраля 1940 г. Павел Прокопьевич скончался. За год до своей кончины он стал жаловаться на сильную усталость и отказался от участия в выборах на должность члена-корреспондента АН СССР,

** Виталий Григорьевич Хлопин (1890—1950) — один из основоположников советской радиохимии и радиевой промышленности; получил первые отечественные препараты радия (1921), основатель Радиевого института, ведущий участник атомного проекта, создал школу советских радиохимиков; действительный член АН СССР (1939), Герой Социалистического Труда (1949).

хотя Владимир Иванович настойчиво выдвигал его на эту должность.

Сохранилось письмо Владимира Ивановича Лидии Федоровне, в котором он смог найти теплые слова для осиротевшей семьи своего дорогого ученика, друга и соратника.

16 марта 1940 г.

Дорогая Лидия Федоровна!

Я не могу до сих пор примириться с уходом из жизни дорогого, мной горячо любимого Павла Прокофьевича. В жизни нам надо с этим мириться, и в моем возрасте (77 лет) особенно это ярко и глубоко сознаешь... Но на нас всех лежит долг — идти вперед в том стихийном стремлении к исполнению жизненного долга, которому до последней секунды был верен, тверд и созидателен П.П.

Я его видел за неделю-другую до его смерти. Он спустился ко мне в музей, куда я пришел для проверки и справки о некоторых данных. Он очень жаловался на болезненное ухудшение — но я и, думаю, он — был далек от мысли о возможности случившегося.

П.П. — когда были выборы в Академию — решительно отказался от участия в них. Сейчас этот вопрос возник вновь. Судьба сложилась так.

Когда я приехал в Москву в 1935 году — я ни разу не смог придти к вам, как я делал это раньше во время моих приездов. Подниматься так высоко без лифта — ввиду ухудшения моего здоровья мне не полагалось — и по врачебным указаниям, и по моим попыткам — по их последствиям. После 1937 года, когда состояние моего здоровья резко ухудшилось... желая не уменьшать темп научной моей работы, вынужден быть еще более осторожен — держать себя в руках.

Поэтому я и теперь не смогу к вам подняться. Но я хочу очень видеть Вас, и Ваша семья мне близка и дорога, и Вы должны смотреть на меня как на одного из самых близких людей — Вы и Ваши дети.

Сегодня на неделю — дней десять я еду в Узкое. Я очень хотел бы, чтобы вы зашли ко мне по моему возвращению. Я очень хотел бы собрать материал для научной оценки П.П. и буду просить Вас помочь мне в этом. Это с одной стороны — а с другой надо обеспечить спокойное продолжение уче-

ния Ваших сыновей. Сейчас они требуют активных действий.

По возвращении из Узкого сейчас же напишу Вам.

Ваш В.Вернадский

Небольшие страницы приведенных здесь писем показывают, что Вернадский умел растить достойных учеников. Подобно своему учителю, Пилипенко был предан науке, умело сочетал преподавательскую деятельность с теоретической и практической научной работой. Особенно большой вклад он внес в область генетической минералогии, т.е. науки, изучающей процесс образования минералов, родоначальником которой был Вернадский. «Минералы рождаются, живут, борются и погибают, побежденные. Их место занимают победители с тем, чтобы подвергнуться той же участи, идет непрерывный обмен вещества» — так образно писал Пилипенко в своей знаменитой монографии [7]. По примеру дорогого учителя много сил он отдал созданию школы московских минералогов, среди них Г.А.Крутов,* П.В.Калинин**, и др. В честь научных заслуг Пилипенко назван минерал пилипенковит.■

* Георгий Алексеевич Крутов (1902—1989) — минералог, доктор геолого-минералогических наук (1955). Выпускник Московского геологоразведочного института (1931), после окончания оставлен на кафедре в качестве аспиранта, ассистента, а затем доцента, в 1936 г. защитил кандидатскую диссертацию под руководством Пилипенко. Работал во Всесоюзном институте минерального сырья (1933—1952), профессор кафедры минералогии МГУ (с 1955 г.). Специалист по минералогии и геохимии кобальта. Принимал участие в освоении и промышленном использовании никель-кобальтовых руд в целом ряде районов нашей страны, а также в Китае, Северной Корее и Чехословакии. Развивал вслед за Вернадским и Пилипенко теорию парагенезиса минералов. Лауреат премии им.А.Е.Ферсмана (1962), в его честь назван минерал крутовит.

** Павел Васильевич Калинин (1905—1981) — геолог, профессор, исследователь Южного Прибайкалья, ученик Пилипенко, один из пионеров советской геологии слюд. В середине 1930-х годов Павел Васильевич создал наиболее полную и детальную сводку «Минералы Слюдянского района», ставшую классической и включившую около 100 минеральных видов и разновидностей. В 1950—1960-х годах — профессор кафедры минералогии МГРИ. В его честь назван минерал калининит.

Литература

1. Вечно яркая ищущая молодость. Ученые о В.И.Вернадском // Природа. 1963. №3. С.54—60.
2. Гумилевский Л.И. Вернадский / Жизнь замечательных людей. Вып.2 (325). М., 1967.
3. Владимир Вернадский. Жизнеописание. Избранные труды. Воспоминания современников. Суждения потомков. М., 1993.
4. Профессора Томского университета. Библиографический словарь. Т.2: 1917—1945. Томск, 1998. С.344—346.
5. Вернадский В.И. Записка в группу геологических наук АН СССР. 30.01.31 // АРАН. Ф.518. Оп.1. №319. Л.1—5.
6. Вернадский В.И. О кристаллах α -серы и о русских их местонахождениях // Bull. Soc. Nat. Moscow. 1903. Т.16. № 4. P.479—501.
7. Пилипенко П.П. Минералогия Западного Алтая. Томск, 1915.

в лекционный зал. На лекциях не менее великого Либиха несколько высокопоставленных особ даже пострадали при нечаянном взрыве. Химики становились желанными гостями во всех салонах. Работы Дэви по электрической теории соединений были удостоены Большой премии Вольты Парижским институтом в 1806 г., когда Англия и Франция находились в состоянии войны, самые высокопоставленные особы обоих лагерей наперебой зазывали его на обед, а в 1812 г. Наполеон лично распорядился впустить его во Францию — таков был престиж науки, от начала времен и по нынешний день являющийся главным средством ее «силового давления».

К Фарадею в ученицы напрашивались дамы из высшего света, а сам он, скромнейший из скромных, на вопрос правительства об отличиях для ученых ответил, что их непременно нужно выделять и поддерживать, но не обычными титулами и званиями, которые скорее *принижают, чем возвышают, ибо способствуют тому, что умственное превосходство утрачивает исключитель-*

ность: отличия за научные заслуги должны быть такими, чтобы никто, кроме ученых, не мог их добиться. Так могут ли массы видеть в научной аристократии своего союзника, разделять ее направленные на собственную исключительность психологические интересы, чрезвычайно важные для всякого единения?

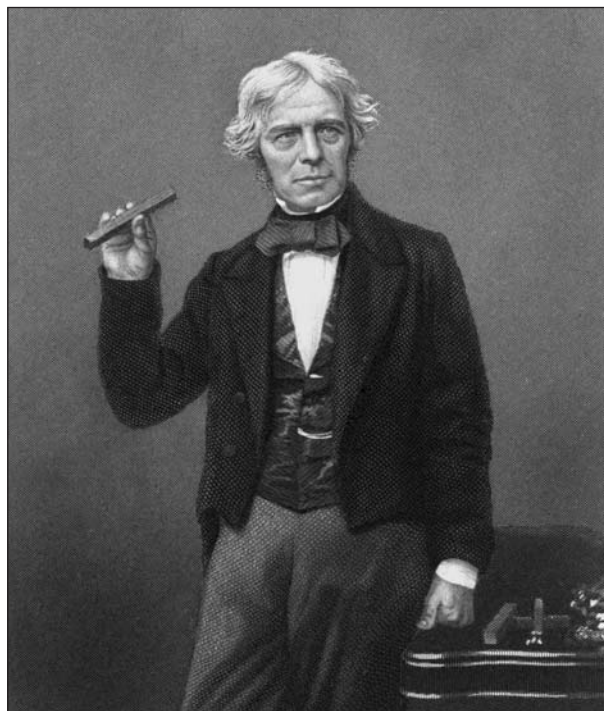
Но, может быть, самим ученым дороги интересы масс? Ведь многие из них были самыми настоящими благодетелями человечества.

Гельмгольц, один из величайших классиков как в физике, так и в физиологии, честно признавался: *было бы несправедливо говорить, что сознательной целью моих работ с самого начала было благо человечества. На самом деле меня толкало вперед неодолимое стремление к познанию.* Гельмгольц ощущал науку не столько полезным, сколько бессмертным и *святым* делом.

Головокружительно гениальный Пуанкаре тоже не скрывал, что не считает облегчение человеческих страданий достойной целью человеческого существования, поскольку смерть избавляет от



Хамфри Дэви (1778—1829). Английский химик и физик, открыл опьяняющее действие закиси азота (веселящий газ), выделил бор из борной кислоты, электролитическим путем получил амальгамы кальция, стронция, бария и магния; предложил водородную теорию кислот; сконструировал безопасную рудничную лампу с металлической сеткой (лампа Дэви); указал на роль минеральных солей в питании растений. Покровительствовал Фарадею. Член Лондонского королевского общества (с 1820 г. — президент), иностранный почетный член Петербургской АН (1826). — *Примеч.ред.*



Майкл Фарадей (1791—1867), английский физик-экспериментатор и химик. Создал первую модель электродвигателя, первый трансформатор; открыл химическое действие тока, законы электролиза, действие магнитного поля на свет, диамагнетизм; первым предсказал электромагнитные волны. Основоположник учения об электромагнитном поле, ввел понятие физического поля как непрерывной области пространства. Член Лондонского королевского общества (с 1824 г.) и многих других научных организаций, в том числе и Петербургской АН (1830). — *Примеч.ред.*

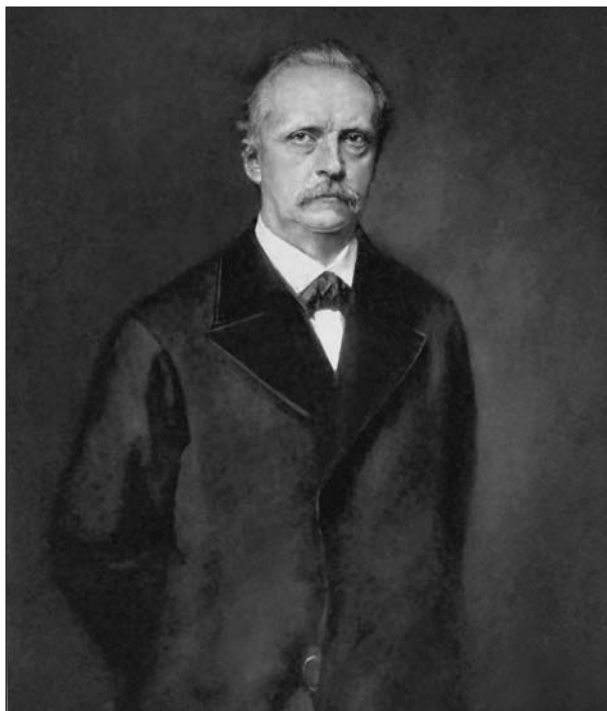
них гораздо более надежно. Люди практические требуют от нас способов добычи денег, но стоит ли тратить время на такую чепуху, тогда как лишь науки и искусства делают наш дух способным наслаждаться? Говорят, — иронизирует Пуанкаре — что наука полезна из-за того, что позволяет создавать машины, — нет, напротив, это машины полезны из-за того, что оставляют людям больше времени заниматься наукой! Цель же науки — красота, ученый стремится к поиску наибольшей красоты, наибольшей гармонии мира, и вот наибольшая-то красота и приводит к наибольшей пользе! Только неизвестно когда. И неизвестно в какой стране. Так что те, кто здесь и сейчас вкладывает деньги в фундаментальную науку (а все остальное, строго говоря, не наука), не будут иметь практически никаких преимуществ перед остальным человечеством, когда придет время собирать плоды.

Но как же выделяется бюджет на науку в демократических государствах, где электорат пользуется решающим влиянием? Неужели ему так близ-

ки поиски красоты, которой он насладиться уж никак не сумеет?

Чтобы выделять субсидии на астрономию, по словам все того же Пуанкаре, нашим политическим деятелям надо сохранять остатки идеализма. Можно бы, конечно, рассказать им о ее пользе для морского дела, но пользу эту можно было бы приобрести гораздо дешевле. Нет, астрономия полезна, потому что она величественна, потому что она прекрасна, — вот что надо говорить. Она являет нам ничтожность нашего тела и величие духа, умеющего объять сияющие бездны.

Вот тут-то мы и нащупали главный рычаг, посредством которого наука оказывает давление на общество: она рождает восхищение и гордость за человека — именно в этом заключается едва ли не важнейшая ее социальная функция. Ибо потребность ощущать себя красивым и значительным, причастным чему-то великому и бессмертному — я называю такое ощущение экзистенциальной защитой, — ничуть не менее важна, чем потребность в комфорте и безопасности, тем более что



Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц (1821—1894), немецкий физик, врач, физиолог и психолог. Сформулировал закон сохранения энергии, создал концепцию бессознательных умозаключений. Разрабатывал математическую теорию для объяснения оттенков звука с помощью обертонов, изобрел офтальмоскоп для изучения глазного дна и офтальмометр для определения кривизны роговицы. Заложил основы гидродинамики и научной метеорологии. Ряд технических изобретений носит его имя: катушка для создания магнитного поля, резонатор для анализа акустических сигналов). — Примеч.ред.



Анри Пуанкаре (1854—1912), лидер французских математиков, механик, физик, астроном, философ. Основоположник качественных методов теории дифференциальных уравнений и топологии. Создатель основы теории устойчивости движения. Еще до Эйнштейна сформулировал основные положения теории относительности. В философии создал новое направление, названное конвенционализмом. Ученый, охвативший все результаты математики своего времени. Глава Парижской академии наук (1906), член 30 академий, в том числе и Петербургской АН (1895). — Примеч.ред.

она в принципе недоступна для человека, сколько бы он ни увеличивал свою власть над природой. Силы хаоса, распада всегда останутся неизмеримо мощнее всей человеческой техники. От раздавливающего (и совершенно обоснованного) чувства своей мизерности и мимолетности в бесконечно огромном и бесконечно равнодушном космосе человека может хотя бы отчасти избавить лишь иллюзия включенности в какую-то прекрасную и бессмертную традицию. И наука дарит тем, кто сумеет ею очароваться, самые, может быть, сильные грезы, позволяющие ощутить жизнь чем-то значительным и не заканчивающимся с нашим личным существованием.

Надо хорошенько понять, что экзистенциальные проблемы более важны, чем экономические: чтобы потреблять с удовольствием, нужен хороший аппетит, который невозможно сохранить, взирая без завораживающих иллюзий в поджидующую каждого из нас неотвратимую бездну. Однако, если долго и умело внушать человеку, что экономика первична, а все идеальные потребности не более чем пережиток метафизических и тоталитарных эпох, он может понемногу в это и поверить. Разумеется, лишь на сознательном уровне, томление по высокому и бессмертному его все равно не покинет, принимая форму скуки, тоски, поисков забвения в наркотиках и сектах, как религиозных, так и политических, — но бюджет-то распределяется на уровне сознания!

И если прагматизм окончательно убьет в обществе остатки идеализма, а вслед за ними и приличия, требующие этот идеализм имитировать, исчезнут последние стимулы беспокоиться о науке и культуре. А уж силой они тем более ничего не выдерут — слишком уж немногими разделяются их ценности.

Но кто, скажите на милость, столько лет проповедовал прагматизм как высшую государственную и политическую мудрость? Кто столько лет вбивал в наш тугой слух, что ценность и цена одно и то же — ценностью является лишь то, что пользуется спросом? Кто повторял и повторяет, что правительство — наемные служащие, нанятые для удовлетворения нужд населения (в массе своей абсолютно безразличного к судьбам романской филологии, экзистенциальной философии и высшей алгебры), а государство — нечто вроде службы быта, а не институт, предназначенный прежде всего для созидания и сохранения коллективных наследуемых ценностей, в число которых несомненно входят таланты наиболее одаренной части населения? Кто все это нам внушает 20 лет подряд, если не штатные пропагандисты той пошлости, которую им было по уровню их дарований естественно воспринять как либеральную идею? Кем либеральная идея трактовалась не как средство самореализации наиболее одаренных, а как диктатура заурядности, осуществляемая через рыночный спрос? Может быть, это были выходы из

КГБ? Если так, это была их самая гениальная операция со времен прославленного «Треста» — никакие коммунисты для дискредитации либеральной идеи не сумели сделать и сотой доли того, что сотворила либеральная пошлость, революция лавочников и лавочников, которой, увы, прокладывало путь и научное свободомыслие.

И пока такая почти внерыночная и почти бесполезная, а всего лишь прекрасная, всего лишь грандиозная вещь, как наука, не станет снова ощущаться общим предметом восхищения и гордости — гордости и перед собой, и перед другими народами — любое правительство всегда будет поддаваться соблазну отнять у бессильных и бесполезных для подкупа сильных и нужных.

А статья самим партией интересов, а не идеалов, ученые не смогут никогда: их слишком мало, их потребности суть потребности крайне узкой аристократической корпорации. Если аристократы духа, единого прекрасного жрецы открыто выставляют свои истинные заботы на всенародное голосование, они получают еще меньше, чем сегодня имеют от правительства. Я не хочу повторять вслед за Пушкиным, что правительство у нас единственный европеец, это не так. Но у меня есть серьезные опасения, что оно все-таки европеец в гораздо большей степени, чем тьмы и тьмы электората. Или по крайней мере больше заинтересовано в престиже страны.

Лучше лишний раз повториться, чем остаться непонятым: влияние ученых всегда было основано не на их электоральной силе, а на престиже науки. Вернуть науке ее былой авторитет — как и вообще внушить людям какие бы то ни было чувства, не приносящие лично им никакой материальной выгоды, — хотя бы в какой-то мере способно только искусство. Обаяние науки было создано прежде всего поэтами в широком смысле этого слова — людьми, умеющими изобразить науку чем-то прекрасным и возвышенным. А потому возрождение науки — возрождение уважения к ней — может прийти лишь через возрождение антипрагматической культуры. Это задача на годы, если не на десятилетия, при том маловероятном условии, что этим займется какая-то серьезная общественная сила.

А куда привязанность народа к науке столь несоизмеримо уступает его любви к футболу (попробовал бы кто-нибудь ликвидировать стадионы!), ей не на кого рассчитывать, кроме как на государство. Причем на его добрую волю, а не на вынужденные уступки, ибо инструментами давления ученые заведомо не располагают и при сохранении своего нынешнего авторитета в массах располагать никогда не будут.

Но пробуждать добрую волю правящего слоя, подчеркивая свою враждебность ему... «Мы ваши враги, а потому вы должны содержать нас», — такой метод агитации рассчитан разве что на святых. Не лучше ли задаться другим вопросом: а так

ли уж противоположны интересы науки и власти? Так ли уж опасно неизбежное научное фрондерство и вольномыслие (как правило, дилетантское, а потому утопическое, в чем его единственная опасность) для прочного государства? Нет ли у государства и науки общего и притом опаснейшего врага? Помните, что писал о «Медном всаднике» Георгий Федотов в своей классической статье «Певец Империи и свободы»? В «Медном всаднике» не два действующих лица, как часто утверждали, — Петр и Евгений, государство и личность; из-за них явственно встает образ третьей силы — стихии. Стихии не только природной, но и людской: «Это все иррациональное, слепое в русской жизни, что, обуздываемое Аполлоном, всегда готово прорваться: в сектантстве, в нигилизме, в черносотенстве, в бунте».

Я советовал бы всем ученым вольнодумцам почаще перечитывать эти слова и не воображать наш трагический мир слишком уж простым и биполярным. А потому, отнюдь не закрывая глаз на подвиги власти, всегда помнить и о соседстве третьей силы.

Впрочем, в ультралиберальных кругах считается неприличным говорить об опасностях черносотенства и бунта, ибо тем самым вольнодумец льет воду на мельницу власти, предстающей вроде как еще и не самым большим злом, тогда как либеральный катехизис повелевает считать самым большим злом именно государство. Однако на Сенатской площади, помимо Невы, символизирующей в любой момент готовые выйти из берегов силы мирового хаоса, незримо присутствует и еще один, незримый, враг: скука. Чувство ничтожности, бессмысленности земного существования. Спасения от которого все нормальные люди ищут в приобщении к чему-то великому и прекрасному. И когда потомки бедного Евгения из Урюпинска и Чухломы фотографируются на фоне гениальной скульптуры, мы воочию наблюдаем, как власть, гений и рядовой человек протягивают друг другу руку.

К счастью, бунт обрушивается на нас довольно редко, а потому в промежутках нетрудно делать вид, что он и вовсе не опасен. Но вот бессмысленность существования плющит простого человека неотступно — об этом говорит кошмарное число алкоголиков и самоубийц. Успехи науки — это как раз те праздники, которыми при умелом преподнесении можно было бы встряхивать монотонное существование простого человека, а заодно вербовать в ряды ученых новых романтиков. Но делается ли хоть что-нибудь в этом роде?

Не помню, заметило ли хоть одно средство массовой информации, что 2005 год — это не только год столетия Первой русской революции, но и специальной теории относительности (СТО). Шума во всяком случае было не слышно. Нам не до науки — мы строим капитализм, а ноблэс, так сказать, обязывает быть прагматичными. Жизнь духа должна

быть рентабельной. Мы и дышать откажемся, если нам хорошенько не заплатят.

Удивительно, правда, что эпоха неудержимого роста британского капитализма (чтобы не сказать — империализма) была одновременно эпохой Ньютона и величайшей моды на все научное. И ничего, росту ВВП это не препятствовало. Может, у нас потому и капитализм такой мелкобуржуазный, вороватый, что совершенно лишен романтического, утопического начала? Либерализм явился к нам в каком-то кастрированном виде — не как ставка на талант, оригинальность, а как всеобщая погоня за ординарностью, в которую, похоже, вступили и ученые...

Понимающие люди разясняют, что деньги в науку вкладывают исключительно ради ее практической полезности, однако этим они раскрывают лишь собственные мотивы, но ничего не говорят о чувствах ни самих ученых, ни тех, кто ими восхищается. Тогда как топливо всякой духовной деятельности вовсе не деньги, но — восхищение, деньги лишь техническое средство. И у государства не станет причин поддерживать науку материально, если она не будет предметом восхищения и гордости «электората», всегда и везде состоящего главным образом из профанов, — равно как и среди футбольных болельщиков сами футболисты составляют крошечное меньшинство.

К счастью, профанам вполне доступно бескорыстие, вопреки тому, что нам столько лет внушает либеральная пошлость, — это очевиднее всех сегодня демонстрируют спортивные болельщики. Но восторг, повсюду сопровождавший создателя теории относительности, пожалуй, был недостижим даже для футбольных и эстрадных звезд. «Прагматичные» американцы бежали за автомобилем Эйнштейна, чтобы только дотронуться до священного бампера; изготовители гигиенических средств и алкогольных напитков заманивали его суммами, превосходящими тогдашнюю Нобелевскую премию, только за то, чтобы он с похвалой отозвался об их продукции: они понимали, что их потребителю будет лестно соприкоснуться с гением хотя бы и в столь опосредованной форме.

И все это при том, что открытия Эйнштейна никому из них не сулили ни малейшей выгоды: есть абсолютное время или нет абсолютного времени, евклидово наше пространство или, наоборот, риманово — что, казалось бы, простому человеку эта заумная Гекуба? Но люди, самые обыкновенные люди, и тогда, и сейчас, повторяю и повторяю, хотят прикоснуться к чему-то великому и бессмертному. И государство, отказывающееся поддерживать науку, отказывает своим гражданам в необходимейших духовных витаминах.

Фантастический социальный успех теории относительности наводит на чрезвычайно важную догадку: авторитет науки основывается не на том, что она создает полезные вещи, а на том, что она поражает воображение. Все изобретатели элект-

рических утюгов давно забыты, но живет и побеждает мифический образ Эйнштейна, потрясшего мир чудом и тайной, сотворившими и невиданный авторитет. И когда сегодня ученые мужи надеются вернуть утраченный престиж науки стандартными средствами общественного воздействия — подкупом и угрозами, то стараясь доказать свою экономическую полезность, то заговаривая о создании собственной партии, — они забывают о самом эффективном третьем пути — пути очарования, формирования коллективных мифов. Гонимая же за ординарностью, пытающаяся уподобиться металлургам и генералам, ученые обречены окончательно затеряться за их несопоставимо более широкими спинами.

Научные грезы не могут выжить, не сделавшись частью грез художественных, не опираясь на чудо, тайну и авторитет. Но, увы, — очаровывать может лишь тот, кто сам очарован...

Похоже, дело и впрямь не столько в недостатке каналов массовой информации, уделяющих внимание науке, сколько в нехватке людей, способных изображать науку как захватывающее приключение, как волшебную сказку, — это говорю не я, это Мария Складовская-Кюри. Или такие люди все-таки есть, но именно они-то и нежелательны для властителей экрана, желающих блистать самими? Имел же Александр Гордон собственную программу — и сумел-таки подтвердить, что наука есть беспредельное занудство.

Городу и миру нужны не просто ученые-профи — нужны ученые-поэты, способные не только изложить суть открытия, но и умеющие сначала пережить, а потом и изобразить его чарующей грезой. Нужны не просто крупные открытия и крупные ученые — нужны открытия-легенды и люди-легенды. Но мы не только не создаем новых легенд — мы забываем старые.

Я бы посоветовал заинтересованным в развитии науки средствам массовой информации открыть специальную рубрику «Пропущенные даты», чтоб хотя бы с укоризненным опозданием напоминать о разных исторических событиях, связанных с чем-то вечным, затерянным за вспышками звезд-однодневок.

Пока имена великих ученых не будут вызывать у нас восхищение, российская наука не оживет. Потому что всякое творчество питается прежде всего не деньгами, а бескорыстным восхищением, расходящаяся цепная реакция которого в конце концов и разрешается вспышками шедевров.

Судьба каждого большого ученого помимо прочего еще и высокая драма, способная открыты и высокий драматизм самой науки. Вот чем прорастает ее престиж и завлекательность для романтической молодежи, которая и составляет авангард любого социального прорыва. Нет ничего проще, чем систематически раскрывать городу и миру драматические судьбы нынешних ученых — наших современников и сограждан. Нужно

всего лишь привлечь на службу не только *специалистов по пиару*, но еще и художников.

Правда, для этого и возглавлять нашу науку должны не только бизнесмены и завхозы, но хотя отчасти еще и поэты. В душе. Этого вполне достаточно.

Все это писалось еще до последнего наезда государства на Академию наук, который мы в какой-то степени накликали сами. Ведь наши толки об угасании науки, не угасающие уже лет 20, могут пробудить только планы — разумеется, каких-то реформ, — чего же еще? Пусть прима сядет против вторы, тогда пойдет уж музыка не та, наука сделается — вот оно, петушиное слово! — *эффективной*.

Но догадываются ли эффективные менеджеры, вчера готовые управлять лавкой, а сегодня академией, что наука и эффективность имеют между собой чрезвычайно мало общего? И наука появилась на свет так недавно именно потому, что древние народы гнались не за знаниями, а за эффективностью.

Возможно, и обезьяны так и не могут превратиться в людей из-за того, что слишком уж озабочены эффективностью: они стараются не делать ничего, что не приближает немедленно к практическому результату. Если подвесить перед ними банан, наши мохнатые родственники станут прыгать до изнеможения и, лишь отчаявшись, примутся искать, на что бы взобраться. Если поблизости есть ящик, они подтащат его ровно до того места, откуда уже можно еле-еле допрыгнуть. А если ящик загрузить камнями, чтобы испытываемые не могли его сдвинуть с места, они примутся до изнеможения тянуть его, толкать, и только самые гениальные догадываются выложить камни. Притом ровно столько, чтобы можно было, надрываясь, доволочь ящик до нужного места — до такого, откуда опять-таки можно едва-едва допрыгнуть.

Многие великие державы древности до обидного (для рода человеческого) походили на обезьян. В Египте была великолепно развита астрономия, но только для сугубой пользы — для прогнозирования разливов Нила. Египтяне знали приблизительные формулы вычисления простейших площадей и объемов, но абстрактную геометрию не развивали. Зато древние греки заложили основы и логики, и геометрии, и теории чисел, гордясь бескорыстной любовью к знанию: стремление к пользе Сократ именовал рабской склонностью. Но разве, скажем, римлянам в их бесконечных войнах не пригодились бы пушки вместо катапульт? Для этого всего-то навсего требовалось изобрести порох. Правда, в те времена на него можно было набрести лишь случайно, ибо химии не только не существовало, но никто и не помышлял о ее создании: даже алхимиков впоследствии интересовали не бескорыстные законы взаимодействия веществ, а получение золота из неблагородных металлов и обретение бессмертия — т.е. стремились они или к ближайшей выгоде, или к чуду.

И медицина, даже когда она уже начала нащупывать целебные средства опытным путем, все равно не собиралась отказываться от помощи чудес: к лекарствам прилагались еще и заклинания. Наука и родилась в том учреждении, которое не без успеха пыталось приватизировать мир чудесного, — в церкви. Конфликт между ею и наукой веками оставался внутренним церковным конфликтом, ибо простому народу во все времена было не до подобных изысканностей, а тогдашняя аристократия меча считала достойным делом исключительно войну и государственное управление. Повлекли ее в научный мир, кажется, тоже прежде всего «чудеса науки».

Науке прежде всего нужны свобода и бескорыстное восхищение, но нынешние массы, похоже, не могут испытывать почтение к тому, что не уважается властью. И покуда власть ценит только эффективность, науки в России не будет, как ее не было в сверхэффективных для своего времени Риме и Египте.

Но мороком эффективности сегодня одурманена и научная элита. Хотя, перестав считать себя солью земли, согласившись мерить свое дело мерками купцов, промышленников и генералов, ученые перестают быть учеными, но тоже превращаются в купцов и генералов, которых и следует отправить в войска и супермаркеты, ибо в науке от них толку будет мало: ученые должны чувствовать себя кастой более высокой, чем все воротилы мира сего.

И распоряжаться учеными не должен никто, кроме ученых, — любой чиновник или менеджер может разве что их обслуживать, ибо, чтобы руководить учеными, нужно быть не просто умнее, но *идеалистичнее* — где вы такое встречали среди эффективных менеджеров?

Мне могут сказать, что и в нынешних академиях и директорах научных учреждений идеальности негусто, — если так, значит, науке не помогут уже никакие припарки. Но реанимацию ее может осуществить лишь она сама.

Разумеется, лишь в том случае, если ее живые органы и клетки окажутся сильнее мертвых. Ну а если внутри самой науки уже недостает бескорыстной любви к знанию, ее тем более не отыскать и снаружи.

Но я почему-то верю, что научная коррупция все-таки более чиста и бескорыстна в сравнении с общегосударственной, хотя многие со мной не согласны.

Во всяком случае на плебс рассчитывать не приходится — толпа во все времена жаждет или выгод, или чудес. Никакие, даже самые умные журналы, борющиеся с лженаукой, науке не помогут, ибо наука, как бы много она ни открывала, всегда еще больше закрывает. Она отрицает возможность добыть энергию из ничего, наложением рук исцелить смертельную болезнь, словом остановить бурю, по кофейной гуще узнать будущее, посредством блюдечка связаться с умершими — со-

гласитесь, эти чудеса будут куда позавлекательнее всех компьютерных томографов и мобильных телефонов. И похоже, даже самые квалифицированные борцы с лженаукой не понимают, что борются не с отдельными шарлатанами, но с человеческой природой, жаждущей чудес.

Сегодняшний разгул мракобесия — всего лишь возвращение к норме, ибо за все тысячелетия своего существования человечество только считанные минуты прожило без веры в магию, да и в эти минуты оно больше притворялось, что отказалось от нее, под давлением массивированной пропаганды и — будем называть вещи своими именами — государственного террора.

С тех пор как человек сделался человеком, т.е. существом, способным испытывать страх перед еще только воображаемыми опасностями, перед ним предстали две одинаково важные, но постоянно борющиеся за первенство задачи: предвидеть будущее и примириться с результатами этого предвидения, всегда ужасными, стоит заглянуть в реальность подальше и поглубже. Человечество потратило тысячи и тысячи лет, пытаясь решать эти задачи одновременно средствами магии, и только многие века неудач заставили наиболее мудрую его часть отделить познание (предвидение) от утешения и создать для каждой из этих функций собственный социальный институт: для познания науку, для утешения — религию, искусство, социальный утопизм и некоторые другие воздушные замки в царстве грез. Несомненно, на первых порах (тоже длившихся целые века) и наука тоже оперировала мало на чем основанными фантазиями и аналогиями, но ее фундаментальное положение, отделившее ее от магии, всегда оставалось неколебимым: наука исходит из того, что все естественные процессы протекают по их собственным законам и мы должны эти законы как-то разгадать, — магия же полагает, что миром правит некая воля или целые сонмища воли, на которые можно воздействовать мольбами, подкупом, правильным поведением, распознанием тайных команд, которым невидимые воли повинуются, другими волями (колдунов и пророков), еще более могущественными...

Словом, магия была попыткой перенести законы социальной действительности на внесоциальную природу — именно расставание с этой химерой и было первым и едва ли не важнейшим шагом ко всем будущим «чудесам науки». Именно так: наука начинается с признания того, что в мире, кроме нас самих, никаким высшим волям до нас нет ровно никакого дела, что у природы нет любимчиков и что каждый из нас, и святой, и гений, и герой, подлежат ровно тем же законам, что и какой-нибудь червяк или бульжник. А потому сегодняшние маги и знахари пытаются поодиночке или разрозненными партизанскими соединениями взять реванш в войне, уже проигранной много веков назад могущественнейшими регулярными армиями, когда-то полностью контролировав-

шими весь подлунный мир. Сегодняшние шарлатаны и «добросовестно заблуждающиеся» простаки и маньяки любят защищаться тем аргументом, что ученые твердят какие-то вчерашние догматы, тогда как маги осуществляют некий новый поиск, однако дело обстоит ровно обратным образом: именно маги пытаются утвердить зады тысячелетней давности.

Поэтому те общественные силы, в чьи функции входит утешение страждущих, сделали бы весьма благое дело, если бы воспользовались имеющимися в их распоряжении административными ресурсами, дабы удалить с уважаемой части общественного поля арьергардные осколки давным-давно потерпевшей поражение великой армии, продолжающие использовать неконвенциональное оружие.

Подчеркиваю: не полностью и окончательно удалить их с общественного поля, как худую траву, но лишь из его уважаемой части — из газет, телевидения, общественных залов и площадей. Шопенгауэр когда-то называл астрологию величайшим проявлением человеческой самонадеянности: люди мнят, что даже звездам есть дело до их разборок, — так что астрологические прогнозы в солидных СМИ он наверняка бы счел национальным позором. А также сигналом всем остальным магам и пророкам: налетай, братва, наша взяла!

Разумеется, полностью защитить простаков от жуликов невозможно: как выразился один либеральный реформатор далекого прошлого, если люди хотят избавиться от своих денег, никакой закон не сможет им в этом воспрепятствовать. Все, что мы можем для них сделать, это затруднить их обирание, — загнать наперсточников и шулеров в тараканьи закутки, а побежденных хранителей тайны и веры — в катакомбы, пустыни, пещеры. Пускай слухи о творимых ими чудесах расходятся эзотерическим путем, от посвященного к посвященному, но не через объявления на газетных страницах или телеэкранах отвергнувшей их и отвергаемой ими цивилизации.

А на сладкое расскажу о своей недавней поездке в Южную Корею, где меня сопровождал переводчик Мун Су — аспирант-славист, а заодно преподаватель воскресной школы и сын христианского миссионера, работающего в Казахстане. Я спрашивал Мун Су, хотелось ли бы ему, чтобы христианство, а точнее, его пресвитерианская ветвь, которой он принадлежал, сделалась государственной религией. Ни в коем случае, уверенно отвечал он, религия не должна иметь ничего

общего с политикой: когда-то папы хотели управлять королями и дошли до разных «нечеловеческих поступков», стали продавать бумажки с отпущением грехов...

Никакой принудилочки быть не должно, должна быть только свобода вероисповедания.

А как же быть, осторожно спрашивал я, если в школе учат, что земля существует миллионы лет, а в Библии написано, что шесть тысяч? И что должны делать геологи, если они верующие? Я всегда боюсь оскорбить чувства верующих, хотя в них нечасто встречаю подобную же деликатность, но, как видно, для прочной веры каверзные вопросы не более опасны, чем горох для стены. Мун Су разъяснил мне, что человек славит Господа своим трудом, и если он геолог, то должен быть лучшим геологом. И действовать так, как считается правильным в его науке. И только при этом надеяться, что противоречие между наукой и писанием когда-нибудь разрешится. Возможно, появятся новые открытия, возможно, выяснится, что годом в Библии называется что-то другое — не нужно на этом фокусироваться, этот вопрос не настолько важный.

Эта истина не стоит костра, вспомнил я слова Камю по поводу вопроса, земля вращается вокруг Солнца или наоборот. До меня самого лишь с огромным опозданием дошло, что преследования Галилея не были столкновением консервативной церкви с прогрессивным обществом, ибо общество в ту пору наукой вовсе не интересовалось, наука развивалась внутри церкви, и научные распри были до поры до времени ее внутренними конфликтами. Словно отвечая моим мыслям, Мун Су рассказал, что именно христианские миссионеры первыми начали открывать в Корее школы, где преподавались светские науки — до этого в них изучались лишь конфуцианские премудрости. И первые университеты, и первые европейские больницы тоже открыли миссионеры — сами они были не просто священники, но врачи, инженеры...

Вот как надо обольщать — не напором, а дарами, не обличениями, а умениями.

И сегодня из традиционного буддизма и конфуцианства в Республике Корея переходят в христианство самые молодые, образованные и предприимчивые — мощная экзистенциальная защита вполне согласуется с научной рациональностью. И, что особенно важно, не требует шарлатанских чудес.

Может быть, этот слабый свет с Востока — еще и какой-то лучик света в обступающем темном царстве? ■

© А.М.Мелихов,

кандидат физико-математических наук,
писатель, публицист, заместитель главного редактора
журнала «Нева»
Санкт-Петербург

Из жизни зоологической лаборатории

Р.А.Фандо,

кандидат биологических наук,

Институт истории науки и техники им.С.И.Вавилова РАН
Москва

Сатира и юмор всегда были неотъемлемой чертой российской интеллигенции. Смелый полет мысли и вольнодумство ученых способствовали не только расширению диапазона научных исследований, но и расцвету критического взгляда на многие события, происходившие в научной и общественной жизни страны.

В российском государстве первые годы XX века были насыщены политическими и экономическими преобразованиями, научными и научно-организационными новациями. Все это приводило к созданию достаточно развитого научного сообщества и стимулировало в нем наиболее полное проявление характерных признаков российского ученого как особого социального феномена.

Во взглядах ученых данного периода четко кристаллизировывались ценностные ориентиры, принятые представителями интеллектуального труда конца XIX — начала XX в. Общественная позиция многих деятелей науки того времени выражалась в ее определенной оппозиции к власти. Это, с одной стороны, делало положение ученых затрудненным, а с другой — стимулировало их к независимому творчеству. Последнее проявлялось в стремлении к интеллектуальной свободе и непредвзятости суждений.

Эти черты стали приметами творческого своеобразия русских ученых. По всей вероятности, более глубокие истоки возникшего феномена следует искать в той ответственной роли, которую такие черты играли при определении места науки в решении насущных социальных и экономических проблем общества. При этом не следует забывать, что творцы науки всегда или почти всегда выполняли в обществе роль просветителей, учителей, которые формировали научное мировоззрение своих учеников*.

При всей перспективности формирующейся в России на рубеже веков плюралистической системы научно-исследовательских и образователь-

ных центров ведущее место в ней продолжало, как и в предыдущие годы, оставаться за университетами. По словам К.А.Тимирязева, они служили «показателями движения науки в стране... центрами, к которым притягивались новые, свежие силы» [3, с.78].

Главным средством укрепления своей социальной позиции русские ученые считали самоорганизацию, т.е. неформальные объединения. С появлением таких первых организационных образований уже сообщество ученых стало, в свою очередь, достаточно сильно влиять на закрепление основных черт складывающегося «социального портрета» российского естествоиспытателя, на становление стиля его творчества, на развитие научно-организационной активности.

В этот период набирал силу процесс формирования самостоятельных научных школ. Примечательно, что первые из этих неформальных объединений создавались, как правило, при университетах. Классическим примером такого объединения может служить школа зоологов при Московском университете.

Одним из университетских ученых, сумевшим объединить наиболее активных студентов-естествоиспытателей вокруг изучения сравнительной морфологии, анатомии, экологии и эволюции животных, был Николай Юрьевич Зограф. Его студент Борис Николаевич Бугаев (Андрей Белый), так описал внешность Зографа. *Некрупного роста, но плотный, с заостренной бородкою цвета вороного крыла и с такого же цвета глазами, с прямыми и жидковатыми волосами, лишь кажущийся моложавым (коли приглядеться, то старообразный), с болезненно белым оттенком лица без морщин (коли взглянуть — морщины), он — вылитый грек, Зографаки: не Зограф; но основное его выражение — хитрая ласковость; в нос вороний сморкался и прищуривался двумя глазками зоркими...* [4, с.395, 396].

В лаборатории зоологии при Зоологическом музее, которой в разное время руководили М.А.Мензбир и Н.Ю.Зограф, всегда было много студентов. Так, например, в 1908 г. в лаборатории свои исследования проводили 17 человек: В.С.Ильин, Б.Д.Архангельский, Г.Г.Щеголев, С.А.Сидоров,

* Подробнее о сообществе российских естествоиспытателей и социокультурных факторах, повлиявших на его развитие, см. в работах Л.В.Чесновой и Р.А.Фандо [1, 2].



Николай Юрьевич Зограф (1851—1919) — зоолог, ученик А.П.Богданова, работал в Московском университете, занимался гидробиологией, ихтиологией, зоологией беспозвоночных, эмбриологией и гистологией. С 1877 г. — в Зоологическом музее. С 1874 по 1890 г. преподавал естественную историю и географию. В 1885 г. получил должность приват-доцента, а в 1888 г. стал сверхштатным экстраординарным профессором зоологии, с 1898 г. — заслуженный ординарный профессор. В 1891 г. организовал первую в России пресноводную биологическую станцию на оз. Глубокое, в Подмоскowie близ Звенигорода, которая с 1916 г. носит имя Зографа. В 1911 г. создал лабораторию гистологии в университете. Был председателем Зоологического отделения Императорского Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии и Отделения ихтиологии Императорского русского общества акклиматизации животных и растений [5, л.2].

Е.П.Зарина, В.В.Троицкий, Б.В.Дунаевский, Н.С.Смирнов, Г.В.Эпштейн, Н.Г.Любичанковский, Б.А.Ченцов, Г.Ю.Денесман, П.Н.Каптерев, П.Амираев, В.А.Казаков, И.И.Пузанов, Баранович [5, л.49].

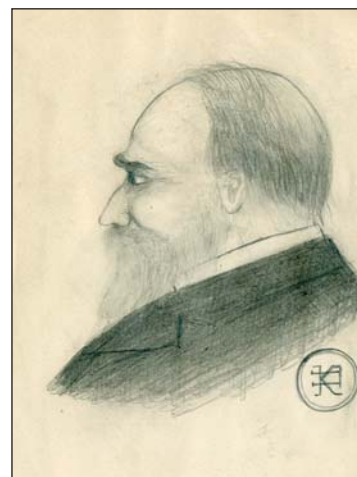
В лаборатории существовали свои негласные законы. Естествоиспытателями на общем собрании была принята *Лабораторная конституция*, регламентирующая правила научной жизни в коллективе. При нарушениях законов и правил с провинившихся взыскивали денежные средства. Лабораторным старостой, в обязанности которого входило соблюдение конституции, был избран Архангельский. *На первых же началах началось столкновение отдельных занимающихся с различными пунктами конституции, и первым поплатившимся был Ильин, громким разговором мешавший другим заниматься спокойно. Названное лицо и впоследствии многократно подвергалось штрафованию за подобное же преступление благодаря отсутствию задерживающих словоизвержение центров. Наибольшую сумму штрафов заплатил Эпштейн, главным образом за нарушение пункта, воспрещающего загромождать чужое место* [5, л.50].

Сами студенты отмечали, что введение *конституции* лаборатории в значительной степени повысило дисциплину и создало благоприятные условия для проведения исследований. Прекратилось использование чужого имущества и загромождение рабочих столов.

Исследователи лаборатории вели сатирический журнал, где записывали интересные случаи из университетской жизни, рисовали карикатуры и дружеские шаржи, помещали свои стихотворные опусы.

В лаборатории велись практические занятия по зоологии. Зоологию беспозвоночных вел приват-доцент Н.В.Богоявленский, зоологию позвоночных студенты часто изучали самостоятельно. Иногда в помещении стоял жуткий запах в связи с тем, что приходилось препарировать старый, разлагающийся материал. *Сегодня такой аромат, что можно возмутиться вонью и выругаться по-сушкински. А староста, предчувствуя, подойдет и скажет: «Я ничего не слышу, мой рак не воняет, как вообще не воняют ни щуки, ни акулы, ни анодонты**». Апеллирую не к конституции, а к совести коллег, которые ведь могли бы быть повнимательнее к тому, что устраивают своей безалаберностью,* — писал студент Дунаевский [5, с.248, 249].

В карикатурах студенты не боялись подшучивать над преподавателями и руководителями университета. В сатирическом журнале есть карикатура на умение Богоявленского долго и невнятно говорить на разные темы. На этом рисунке изображена студентка Е.П.Зарина, о которой даже написана одна строчка в персоналиях сотрудников Зоологического музея [6, с.532]. К сожалению, Г.Ю.Любарскому — автору замечательного фундаментального труда по истории зоомузея, как и многим историкам зоологии — не было известно ни имени Зариной, ни ее отчества. Упоминается лишь, что ей принадле-



Портрет Н.Ю.Зографа. Карандашный рисунок П.Каптерева (19 октября 1908 г.) [5, л.39].

** Anodonta — беззубка, род пресноводных двустворчатых моллюсков, лишенных замковых зубов.

жит заслуга в изучении развития нервной системы речного рака. В сатирическом журнале по поводу Елены Петровны есть такая строчка: *Разрывалась на 4 части, работая одновременно на курсах, занималась зоологией позвоночных, зоологией беспозвоночных, участвовала в занятиях у Ильина (по неэротическому циклу)* [5, с.52].

На карикатурах высмеивались антидарвинистские взгляды (студенты-естественники в большинстве своем стояли на эволюционных позициях) крупного чиновника Министерства просвещения, в прошлом ректора Московского университета и директора Зоологического музея Александра Андреевича Тихомирова. Первоначально Тихомиров был сторонником дарвинизма, а затем встал на позиции яркого антидарвиниста. В.В.Малахов в книге отмечал, что Тихомирова не воспринимали студенты, так как он, несмотря на научные заслуги, был реакционером и консерватором. *Критика дарвинизма снискала А.А.Тихомирову большую популярность среди духовенства, представители которого приходили на его лекции и занимали первые ряды в аудитории. Свои лекции он начинал не с обычного «Милостивые государи и милостивые государыни», а с обращения «Ваши преосвященства, милостивые государи и милостивые государыни». А.А.Тихомиров публично боролся с атеизмом, широко распространенным в университетской среде. Он возмущенно выступал против К.А.Тимирязева, про которого говорил, что он «за казенный счет изгоняет Бога из науки». Особенно А.А.Тихомиров ненавидел либералов. Весьма умеренного либерала и крупного зоолога М.А.Мензбира он пренебрежительно называл «этот жидишка Мензбир»* [7, с.17].

Андрей Белый очень выразительно описал Тихомирова. *Несчастливая внешность! Высокий, вертлявый, худой, серо-дряблый, с бородкою маленькою, серо-русой, небрежно бросающий слова; и вздернутый носик курносый, в пенсне; резкою интонацией и фиштулою картавящего, пришепетывающего голоса, чуть-чуть напоказ, с обезьяноподобными движениями длинных рук, — он не нравился; и называли его «макакой», или — «маркизом»; казался макакою, думая, что он — маркиз; ректор-шармер, антидарвинист, перед нами подчеркивающий дружелюбие и желание всякого благо-*



Борис Николаевич Бугаев (1880—1934) — русский писатель, поэт, теоретик символизма. Известен под псевдонимом Андрей Белый. Сын Николая Васильевича Бугаева — выдающегося математика и философа, декана физико-математического факультета Московского университета, на естественном отделении этого факультета учился юный Борис Бугаев (Белый А. «Ваш рыцарь»: Письма к М.К.Морозовой. 1901—1928. М., 2006).



Елена Петровна Зарина в лаборатории [5, л.6].



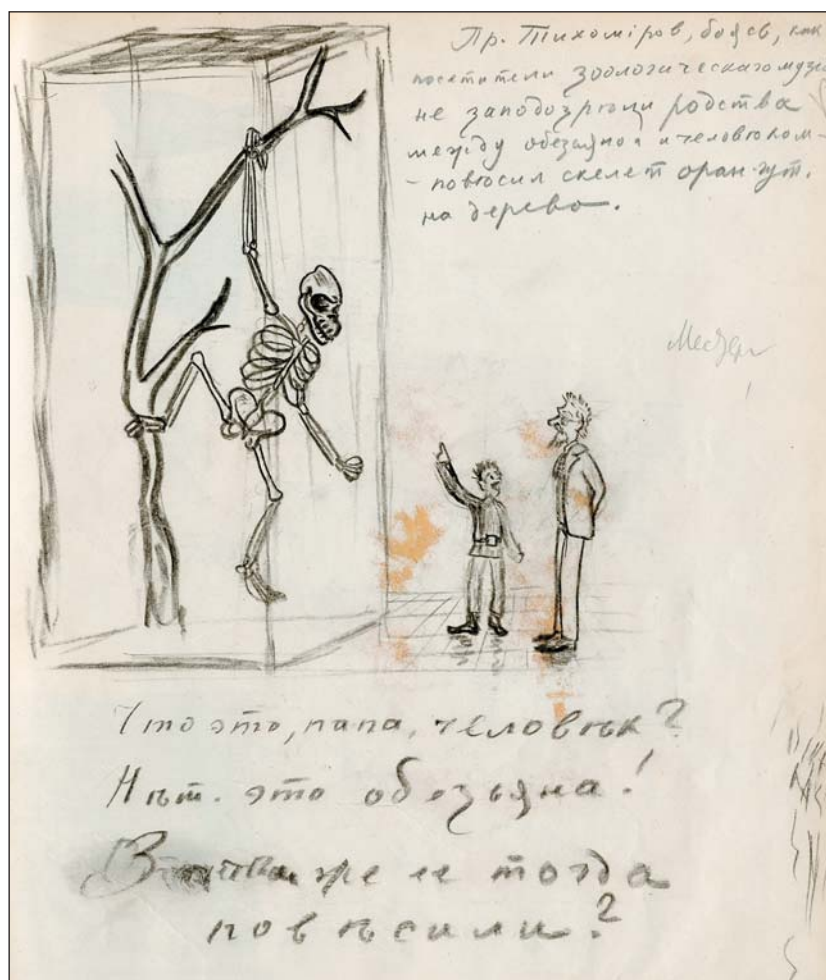
Николай Васильевич Богоявленский (1870—1930) — зоолог, гистолог и эмбриолог, ученик Зографа. После окончания Московского университета в 1894 г. был приглашен на должность внештатного ассистента Зоологического музея (без жалованья), с 1897 г. — штатный ассистент зоомузея, с 1910 г. — приват-доцент в лаборатории Зографа. В 1912 г. защитил диссертацию на степень доктора зоологии («Материалы к изучению овогенеза»). С 1914 г. стал заведовать зоологической лабораторией при Зоологическом музее. В 1919 г. основал биологическую станцию в Болшеве под Москвой, которой руководил до конца жизни. Был путешественником и коллекционером предметов искусства. Совершил научные экспедиции во многие страны мира, в значительной степени обогатив привезенными материалами коллекции Зоологического музея [5, л.107].



Карандашный рисунок И.И.Пузанова из сатирического журнала. Студентка Е.П.Зарина обращается с вопросом к преподавателю Н.В.Богоявленскому и получает следующий ответ: *Видите ли, Елена Петровна, тут следующая история; дело в том, что тут вот такая вещь; дело в следующем и т.д., и т.д.* [5, л.35].

получия нам, вызывал оппозицию; видом своим говорил: не попадитесь на удочку модных теорий; и я — заблуждался, но разобрался; и вот я, как друг, как наставник, как крупный ученый, доказываю правоту своей критики [4, с.391, 392].

Огромную популярность среди студентов имел другой зоолог, полная противоположность Тихомирову, Михаил Александрович Мензбир. К нему [Мензбиру] привлекла отданность его идеям Дарвина: до фанатизма; и — привлекали: научность, самообладание в выборе и экономии фактов, сцепляющих художество лекций его; фактами не загромождал, выбирая типичнейшие, но обставляя последним словом науки, в выборе ретушей и освещений фактов чувствовалась выношенность; говорил трудно, но — популярно; объясню парадоксальную эту увязку противоречивых понятий: включая в лекцию факт, он ставил его в освещении теоретической призмы, стараясь выявить основное ребро и убрать все ненужное; сравнивая Мензбира, как формировщика нашего научного вкуса, с действием различных стилей искусств, я заметил бы, что в нем увлекался художественным реализмом; лекция Мензбира — умный показ строго отобранных сравнительно-анатомических фактов, как стиль постановок художественного театра; смот-



Карикатура с изображением музейного экспоната и беседующих подле него отца и сына. Надписи на рисунке:

Пр[офессор] Тихомиров, боясь, как бы посетители зоологического музея не заподозрили родства между обезьяной и человеком, повесил скелет орангутанга на дерево.

[Диалог между отцом и сыном:]

— Что это, папа, человек?

— Нет, это обезьяна!

— За что же ее тогда повесили?

Карандашный рисунок М.М.Местергази [5, л.136].

ришь «Вишневый сад»; сквозь натуру жестов сквозит тебе символ; слушаешь Мензбира — и вылепляется концепция трансформизма из ткани фактов [4, с.387].

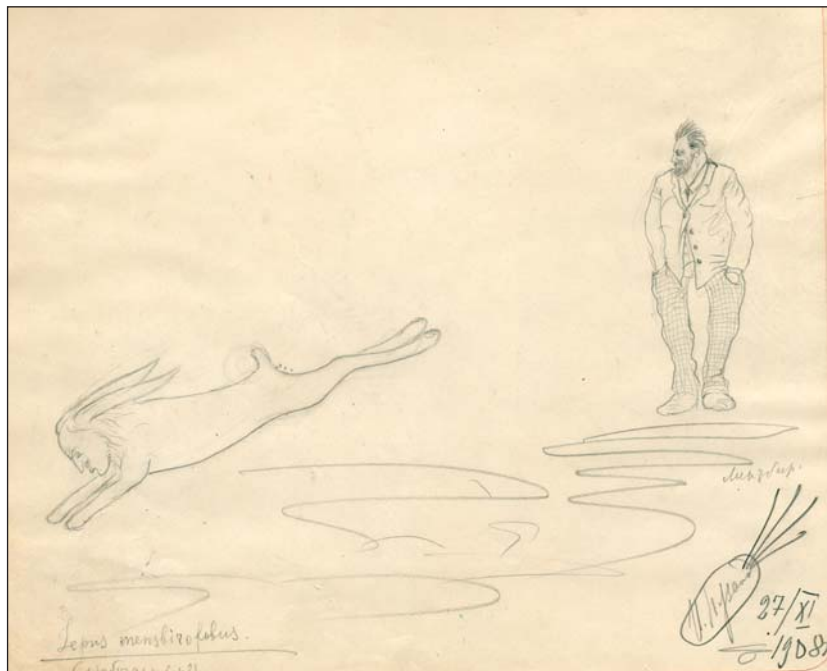
Андрей Белый так описал внешность Мензбира. Небольшого роста, худой, желтый, желчный, со встопорченным чернейшим над огромнейшим лбом клоком, с черной бородкой, сутуло сосредоточенный, с дико выпученными и какими-то желтыми глазками перед собой глядящий, безбровый, весьма неказистый, вступал перевальцем он в переполненную аудиторию, не глядя, не видя, не слыша; глубокая морщина перерезывала выпуклый лоб; первое движение — силою напряжения мускулов рук сдвинуть кафедру, загораживающую от нас доску (всегда забывали убрать эту кафедру); ни позы; ни жеста; одно трудовое усилие: запомнился выгиб тела, сдвигающего тяжесть кафедры; он напоминал первобытного человека иль



Александр Андреевич Тихомиров (1850—1931) — зоолог, директор Зоомузея Московского университета (1896—1906), ректор Московского университета (1899—1904). Занимался изучением морской фауны, анатомией и физиологией тутового шелкопряда, проблемами эмбриологии и онтогенеза. В 1888 г. открыл явление искусственного партеногенеза. К его заслугам относится строительство здания Зоомузея на Большой Никитской улице. С 1904 г. начинает карьеру государственного чиновника и становится директором департамента Министерства народного просвещения, попечителем Московского учебного округа (1911—1917). В 1917 г. в связи с приходом новой власти лишился чина, переехал жить в Сергиев Посад, где прожил в нищете остаток жизни [6].



Михаил Александрович Мензбир (1855—1935) — орнитолог, зоогеограф, создатель одной из крупнейших научных зоологических школ. С 1884 г. доцент кафедры сравнительной анатомии Московского университета. В 1885 г. защитил докторскую диссертацию по зоологии на тему «Сравнительная остеология пингвинов». В 1887 г. избран экстраординарным, а через год — ординарным профессором кафедры зоологии и сравнительной анатомии Московского университета. В 1906—1911 гг. — помощник ректора Московского университета. С 1896 г. — член-корреспондент Императорской академии наук. До революции неоднократно получал предложения стать действительным членом академии, однако отказывался от них, потому что при согласии должен был переехать в Петербург, чего Михаил Александрович очень не хотел. В 1911 г. покинул университет в знак протеста против нарушения университетской автономии реакционными приказами министра народного просвещения Л.А.Кассо. В 1917 г. вернулся в Московский университет и стал его ректором, в этой должности оставался до 1919 г. В 1915—1933 гг. был президентом Московского общества испытателей природы, членом которого состоял с 1880 г. В 1926 г. избран почетным членом, а с 1929 г. — действительным членом АН СССР.



Карикатура, на которой от сурового М.А.Мензбира убегает Н.Г.Любичанковский. Этот студент показан в виде зайца *Lepus mensbirefobus* (заяц мензбиробоящийся). Карандашный рисунок И.И.Пузанова (27 ноября 1908 г.) [5, л.13].

высокоразвитую гориллу, являя кричащее доказательство теории Дарвина; взглянешь и скажешь: «Ну, конечно же, человек происходит от обезьяны». <...> Постояв, помолчав, начинал свою лекцию он, выбивая громким и ровным голосом точные, ровные, гладкие фразы, как выученные наизусть; вероятно, он так говорил от слишком ясной ему картины мысли, насквозь индукции; ровно, строго, спокойно она выбивала в нас твердый рельеф. <...> Кончив лекцию, клал он свой мел и без паузы тихо и прозрачнейше удалялся с опущенною головой, вперяясь перед собой исподлобья, точно это не он выбил в нас барельеф; и точно лекция его — не событие в жизни курса, а просто стирание пыли со шкафа; весьма прозаичное дело; казалось, что Мензбир в любой момент жизни готов прочесть великолепную строгую лекцию и в любой момент лекции этой ее оборвать, чтобы без перехода заняться стиранием пыли; он говорил ведь на лекциях лишь о том, о чем думал двадцать четыре часа в сутки; и оттого было строго молчанье его, что оно было — произносимой научной мыслью. <...> Его часто встречали и провожали аплодисментами, на которые он — ноль внимания: точно их нет; лишь морщина означится, вид станет более зверским; гориллоу-умницей, или пещерным аборигеном он выглядел с головой, переросшею современников на миллионы лет, а — ходит в шкуре. Михаил Александрович, право, казался таким [4, с.389, 390].

По отношению к студентам Мензбир был очень требователен. Строгий к самому себе, Михаил Александрович был также строг к своим ученикам и коллегам. Говорили иногда, что Михаил Александрович суров, по правде говоря, его нередко боялись... И если суровость Мензбира могла уберечь кого-либо из начинающих ученых от легкого отношения к науке, приучала к более ответственному отношению к своей работе, то это одна из величайших заслуг Мензбира как учителя*.

* Гладков Н.А. Из воспоминаний о великом зоологе // Знание — сила. 1951. №8. С.9.

Несмотря на кажущуюся строгость Мензбира, студенты его очень уважали за талант лектора и ученого. *Вид [Мензбира] вовсе не располагал к легкому общению с ним; а любили его за лекции, за строгую честность, за идейную непримиримость к казенному духу; ученый, на десять голов превышающий прочих из группы зоологов, был почти вытеснен из Зоологического музея, куда не являлся, ютясь со своими студентами, местами и коллекциями чуть ли не в частной, специально снимаемой квартире, где было тесно и неудобно: а курс наш ломился работать у Мензбира; мест же не было вовсе [4, с.390].*

Ученик Мензбира С.И.Огнев так восторженно охарактеризовал своего учителя: *Уже при первом знакомстве с М.А. поражаало богатство его внутренней жизни, сила его интереса к науке, тот «божественный огонь», который не угасал в его душе. <...> Его речь, простая и ясная, необыкновенно гладкая без подбора недостающих слов, но лишенная внешних ораторских украшений и эффектов, словно чеканная из драгоценного металла, усваивалась легко и отчетливо. Его слово было в полном смысле вдохновенно, а в момент увлечения глаза его, устремленные в одну точку, загорались каким-то внутренним огнем экстаза, а речь его заражала и захватывала слившуюся в общем подъеме огромную зоологическую аудиторию: на лектора смотрели с возрастающим вниманием сотни напряженных разгоревшихся взглядов [8, с.13].*

Он [Мензбир] стоит передо мной точно высеченным из цельного камня: модель «homo sapiens», возглавляющая коллекции видов Зоологического музея, он — сама научная честность, брезгливо отмежевывающаяся от эффектов, сведения счетов, дешевенького политиканства и прочего. Этому профессору хочется сказать горячее спасибо за то, что он нам, студентам, давал, — вспоминал своего учителя Андрей Белый [4, с.391].

Немногим известно, что Мензбир обладал уникальной коллекцией книг, которая была подарена им Государственному Румянцевскому музею. Широкий диапазон языков, на котором были напечатаны книги: английский, французский, немецкий, латинский, финский, польский, итальянский, венгерский, скандинавские языки [9]. Чтение было одним из любимых занятий ученого, как, впрочем, и многих представителей интеллигенции того времени.

Другой яркой фигурой в Зоологическом музее был ученик Мензбира Петр Петрович Сушкин. Он был настоящий естествоиспытатель, изучал анатомию животных, часами препарировав их в стенах лаборатории. Будучи последователем своего учителя, он проповедовал идеи дарвинизма среди студентов.

Сушкин отличался строгостью и требовательностью к студентам. Его экзамен по зоологии для студентов был серьезным испытанием. Андрей Белый с трепетом вспоминал этот момент своей студенческой жизни.

«Я не терплю этого декадентшишки», — Сушкин шипел про меня до экзамена. «Тройка», полученная у него, — мой триумф!

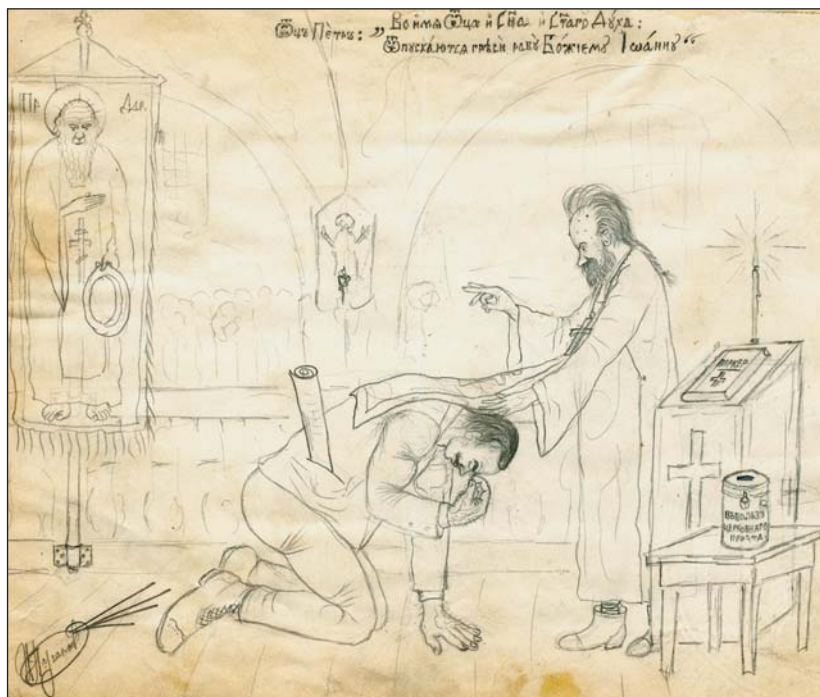
Вспоминаю стол, покрытый зеленым сукном, над которым, как мертвая морда мартишки, помигивала голова Тихомирова, ректора, спрашивавшего пустяк и с «весьма» отпуславшего; вот голова, как гориллы, М.Мензбира — с зеленоватым лицом, с черным вострым волос; точно лаял он на студента, неслышно бросаясь вопросами; около него — широкоплечий, матерый, совсем полонтер в пиджаке, без студента тоскующий Сушкин, доцент-ассистент; он кабаньими глазками ищет себе подходящую жертву из тех, кто, ставивши билетик, готовится за малым столиком, пережидая, когда Тихомиров отпустит студента: бросались к нему чуть не по двое; шли к Мензбиру, который — опасен; а Сушкин без дела сидел: от него все улизывали; кого цапывал, с тем пыхтел долго;



Сергей Иванович Огнев (1886—1951) — отечественный териолог. Сын известного гистолога, профессора Московского университета Ивана Фроловича Огнева. В 1902 г., будучи гимназистом, познакомился с Мензбиром. С 1911 г. преподавал на кафедре зоологии Московского университета, с 1926 г. — доцент МГУ, в 1928—1935 гг. — профессор и заведующий кафедрой зоологии во Втором Московском университете (позднее Московский педагогический институт им.В.И.Ленина), в 1941—1950 гг. — заведующий кафедрой зоологии в Московском городском педагогическом институте им.В.П.Потемкина. В 1935 г. удостоен степени доктора наук без защиты. Огнев по праву считается основоположником отечественной териологии — науки о млекопитающих. Ему принадлежат труды по распространению, систематике, экологии и биологии млекопитающих России и сопредельных государств [6].



Петр Петрович Сушкин (1868—1928) — орнитолог, создатель зоологической школы в Ленинграде. После окончания естественного отделения физико-математического факультета Московского университета был оставлен для подготовки к профессорскому званию. В 1904 г. защитил докторскую диссертацию («К морфологии скелета птиц: 1. Сравнительная остеология дневных хищных птиц и вопросы классификации, 2. Сокола и их ближайшие родственники»), в которой впервые применен анатомический (остеологический) анализ для установления родственных связей между таксонами различного ранга. В 1909 г. избран профессором по кафедре зоологии Харьковского университета, с 1911 по 1919 г. читал там лекции. В 1919—1920 гг. преподавал в Таврическом университете (Симферополь). С 1920 по 1928 г. работал заведующим отделом орнитологии в Зоологическом институте АН (Ленинград). В 1923 г. избран действительным членом АН СССР, а в 1927 г. — академиком-секретарем Отделения физико-математических наук АН СССР. Умер в Кисловодске от воспаления легких в 1928 г. Похоронен на Смоленском кладбище в Ленинграде.



Карикатура на П.П.Сушкина, принимающего экзамен у И.И.Пузанова. На рисунке приведены слова Отца Петра (имеется ввиду П.П.Сушкин): *Во имя Отца и Сына и Святого Духа: Отпускаются грехи рабу Божьему Иоанну* (т.е. И.И.Пузанову). Сам Сушкин изображен в рясе, а «исповедующийся» Пузанов стоит перед своим учителем коленопреклоненный. Рядом изображена хоругвь с изображением Ч.Дарвина и подписью *Преподобный Дарвин*. На аналое вместо Библии располагается учебник Т.Д.Паркера — руководство по зоотомии «*Course of Instruction in Zootomy (Vertebrata)*», издание 1884 г. Карандашный рисунок И.И.Пузанова (10 декабря 1908 г.) [5, л.41].

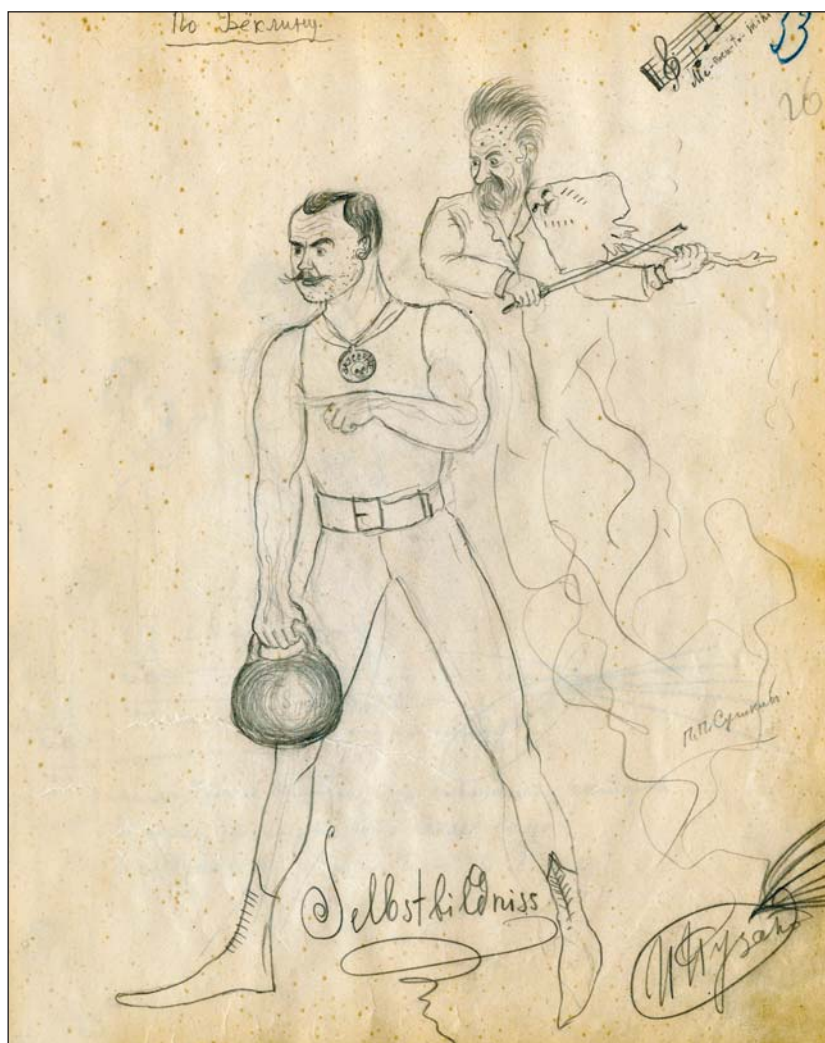
тяжелое, одутловатое, красное, точно в подтеках, лицо; губы, ломти, в светлявой растительности, передергивались и кривились; мясистый, багровый нос; и — сентиментальные, злые глазеночки: не то гусиные, не то кабаньи!

Я, взявши билет (полость носа у млекопитающих), ахнул от радости: без подготовки мозг жарить; моргал очень весело на заморгавшего Сушкина, ждущего жертвочки; Сушкин меня поманил: «Не угодно ль со мною?». Я пошел. Тотчас морщина вспыхнула адскою радостью, уже не пряча намерений.

Сев рядом с ним, — забарабанил; он слушал доклад о строении носов и ноздрей: у ланцетника, рыбы, рептилии; когда я дошел до лягушки, прервал: «Ну, а как развиваются ноздри зародыша?».

Я проглотил свой язык: это ж не анатомия, — а эмбриология, нами не пройденная! Даже Паркер молчит в этом пункте; вопрос повисал без других, наводящих; я импровизировал, но где ж нам знать. Мы Огнева не слушали. Дьявольски перетирая ладонями, Сушкин к вопросу прикалывал; и, веселясь красным носом, с пошлом бросал полуфразы: невежда, папашин сынок; выражаются членораздельно и внятно (намек на «Симфонию»); я знал, что*

* Имеется в виду поэтический цикл Андрея Белого. В годы учебы в 1902 г. вышла первая книга ритмизированной прозы «Симфония (Вторая, драматическая)», которая принесла молодому автору скандальную известность. Затем из-под пера поэта выходят «Северная симфония (Первая, героическая)» (1904), «Возврат. Третья симфония» (1905) и «Кубок метелей. Четвертая симфония» (1908) [10].



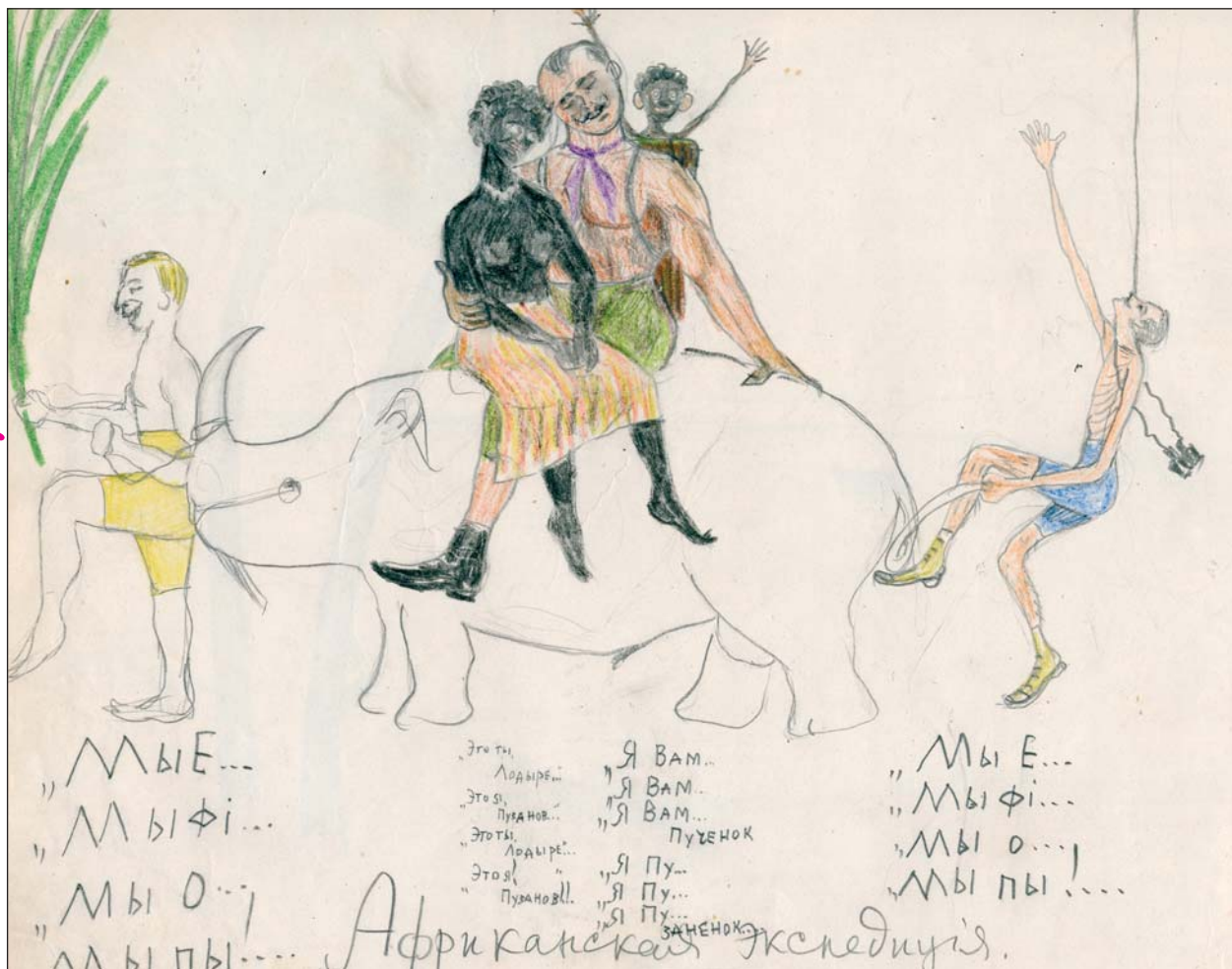
Карикатура на И.И.Пузанова. Красивый, атлетически сложенный, Пузанов показан в costume гимнаста с медалью на шее, на которой выгравирована надпись «За усердие» и изображение черепа. В руках у атлета гиря. На заднем плане — учитель Пузанова П.П.Сушкин, играющий на скате как на скрипке. Внизу подпись на немецком языке *Selbstbildniss*, означающая «автопортрет». Карандашный рисунок И.И.Пузанова [5, л.33].

проваливаюсь: по огневскому курсу; отец – председатель; и – жаловаться – невозможно. Сушкин это учел; даже если позвать председателя, этот доцент будет ставить вопросы: на грани непройденного; спец сумеет всегда провалить; этот даже не валит, а рушит; мы злоеюще молчали; и даже Мензбир удивлялся молчанию, вытянул губы под ухо мучителя; они шептались, Сушкин с издевкой повернулся ко мне:

«А ну-с», — перетер свои руки он, под потолок перемигивал. И мне мелькало: «Сейчас dokonает он черепом рыбы костистой!». «Валите об артериальной системе зародыша в соотношении с матернею системой и об утробном дыхании». Головоломка не хуже костистого черепа! Этот вопрос попал в список моих недоимок; и спец на вопросе подобного рода собьется; я шептал под злоеющий посатик; ни звука в ответ, когда я замолчал; помолчав, продолжал; и мелькало: вру, вру? «Так-с!» — и «Три» вковырнулося; замысел Сушкина рушился [11, с.264, 265].



Иван Иванович Пузанов (1885—1971) — зоолог, зоогеограф, организатор науки. Родился в Курске в семье купца второй гильдии Ивана Васильевича Пузанова. В 1904 г. поступил на естественное отделение физико-математического факультета Московского университета. В 1906 г. вышел из университета, в дальнейшем проходил обучение в Лейпцигском (1906—1907) и Гейдельбергском университетах (1907). В 1907 г. возвращается в Московский университет, где начинает работать в лаборатории Зоографа. Под руководством Мензбира и Сушкина выполняет исследования в области сравнительной анатомии позвоночных животных. После окончания университета с 1911 по 1915 гг. совершает зарубежные экспедиции по изучению мировой фауны. С 1918 г. включается в работу по организации Таврического университета. С 1922 г. по 1925 г. — профессор на кафедре зоологии позвоночных Крымского университета, а затем в преобразованном из этого университета Крымском педагогическом институте (1925—1932). В 1933—1947 гг. работает в Горьковском университете, где возглавляет кафедру зоологии позвоночных. В 1938 г. присвоена ученая степень доктора биологических наук без защиты диссертации. С 1947 по 1971 г. руководит кафедрой зоологии позвоночных Одесского университета [5, л.407(2)].



И.И.Пузанов в окружении жителей Африканского континента. Карандашный рисунок А.В.Румянцева [5, л.161].

Много раз героем различных карикатур в сатирическом журнале оказывался Иван Иванович Пузанов. Поводом для острот была его любовь к силовым видам спорта, таким как борьба и поднимание гири и штанги. Спорт был очень популярен среди его друзей-однокурсников. Кроме биологического практикума студенты под руководством Пузанова занимались атлетикой. Он также обучал юношей приемам французской борьбы*. Каждый день на занятия спортом со студентами лаборатории отводилось по 2 часа 20 минут.

На карикатурах отражены и экспедиции Пузанова. Летом 1910 г. он по заданию Московского

* Французская борьба (греко-римская, классическая борьба) — европейский вид единоборства, в котором спортсмен должен с помощью определенных приемов вывести соперника из равновесия и прижать лопатками к коврику. Во французской борьбе, в отличие от вольной, запрещены технические действия ногами (зацепы, подножки, подсечки) и захваты ног руками. Классическая борьба родилась в Древней Греции, развивалась в Римской империи, а современный вид данной борьбы сформировался во Франции в первой половине XIX в.

общества любителей естествознания, антропологии и этнографии (МОЛЕАЭ) совместно с товарищем по университету В.В.Троицким совершил путешествие по Египту и Судану [12]. Путешествие было очень плодотворным и по количеству, и по разнообразию привезенного в Москву коллекционного материала. Подробное описание этой экспедиции приведено им в книге «Очерки Северо-Восточного Судана» [13], за которую Пузанов получил большую серебряную медаль МОЛЕАЭ.

Важной стороной жизни зоологической лаборатории были дебаты на разные волнующие студентов темы по проблемам науки, образования, искусства, философии, политики и экономики. Такие встречи достаточно серьезно продумывались и организовывались, предлагались темы, готовились доклады, изучался большой пласт литературы по той или иной проблеме. Отвечал за эту работу Ильин. Кроме научных дискуссий поднимались и другие темы. Иногда он даже читал лекции по проблемам сексуальных отношений между мужчинами и женщинами, так как многие студенты в этих вопросах были мало осведомлены [5, л.51].

Многие темы, интересовавшие молодежь лаборатории, часто выносились на страницы сатирического журнала, причем свои мысли некоторые студенты выражали поэтическим языком, оставив последующим поколениям стихи, ярко передающие атмосферу научной жизни начала 20-го столетия.

Из множества сатирических стихов хочется привести очень короткий отрывок из поэмы, написанной неизвестным автором и подписанной псевдонимом «Нестор-летописец». Данный отрывок служит своеобразным источником, позволяющим реконструировать различные эпизоды из жизни зоологической лаборатории [5, с.175, 176]:

*На высокой на горе,
На четвертом этаже*,
С спуском темным и крутым,
Каменистым и крутым,
Притаилась обитель.
Дарвин был ее Спаситель.*

*Доброй милостью Бога
В ней монахов было много.
Весело они жилали,
Спирту много потребляли.
Для работы или нет,
Это будет пусть секрет.*

*Настоятелем там был
Некий старец старожил.
Все на той же на горе,
На втором лишь этаже,
Келью он свою имел
И спастися в ней хотел.*

* На четвертом этаже Зоологического музея располагалась лаборатория зоологии.

*Монастырь устав составил
И игумена поставил
По уставу управлять,
Споры, вздоры разбирать
И творить суды, расправы,
Усмирять крутые нравы,
Благочестье соблюдать
И пример всем подавать.*

* * *

Весьма неполный экскурс в научную жизнь зоологической лаборатории Зоологического музея Московского университета начала 20-го столетия, проведенный в данной статье, поможет современным исследователям и всем, кто интересуется историей науки, понять мировоззренческие и духовные ориентиры, которые были присущи естествоиспытателям, жившим и работавшим на перекрестке Нового и Новейшего времён.

Сотрудники зоологической лаборатории были настоящими *тружениками науки*, работавшими бескорыстно, не для получения личной славы и выгоды, а только во благо науки и общества. Они непоколебимо верили в познавательную мощь естествознания и его преобразующую силу.

Несмотря на чистоту своих помыслов и идеалов, молодые исследователи не были *аскетами, кабинетными учеными, книжными червями*. Большинство талантливых студентов были одарены в области изобразительного искусства, и в стихосложении, и в умении пошутить над своими однокурсниками и педагогами. Молодые ученые отличались свободой и независимостью суждений. Сочетая в себе искреннюю любовь к научной деятельности и активную гражданскую позицию, они надолго стали образцами для подражания еще многих поколений научной интеллигенции. ■

Литература

1. Чеснова Л.В., Фандо Р.А. Российские естествоиспытатели (на рубеже XIX и XX веков) // Вестник РАН. 2008. Т.78. №12. С.1103—1110.
2. Чеснова Л.В., Фандо Р.А. Социокультурный портрет российского естествоиспытателя на рубеже XIX—XX вв. // Наука та наукознавство. 2008. №2. С.63—77.
3. Тимирязев К.А. Пробуждение естествознания в третьей четверти XIX века // История России в XIX в. Т.7. Ч.3. М., 1909.
4. Белый А. На рубеже двух столетий. М., 1989.
5. Архив РАН. Ф.1674. Оп.1. Д.461 (отдельные листы и сатирический журнал).
6. Любарский Г.Ю. История зоологического музея МГУ: идеи, люди, структуры. М., 2009.
7. Малахов В.В. «Пока горит свеча...». Очерки по истории кафедры зоологии беспозвоночных Московского государственного университета. М., 2006.
8. Огнев С.И. Михаил Александрович Мензбир // Бюлл. МОИП. Отд. биол. 1946. Т.51. Вып.1. С.5—15.
9. Ковригина С.И. Ученый и педагог М.А.Мензбир и его библиотека // Книга в пространстве культуры. 2012. Вып.1. С.27—31.
10. Спивак М.Л. Андрей Белый // Поэзия Московского университета от Ломоносова и до... Кн.5. М., 2010. С.15—42.
11. Белый А. Начало века. М., 1990.
12. АРАН. Ф.1674. Оп.1. Д.185. Л.2.
13. Пузанов И.И. Очерки Северо-Восточного Судана: заметки и наблюдения натуралиста. М., 1912. Т.19. Кн.1—2, 3—4; 1913. Т.20. Кн.4; 1914. Т.21. Кн.5.

Правила для авторов

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

ся и проходят редакционную подготовку.

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

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

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

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

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

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

Над номером работали

Ответственный секретарь

Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы

О.О.АСТАХОВА

М.Б.БУРЗИН

Т.С.КЛЮВИТКИНА

К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА

О.И.ШУТОВА

Выпускающий редактор

Л.П.БЕЛЯНОВА

Литературный редактор

Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор

Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией

И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод:

С.В.ЧУДОВ

Корректоры:

М.В.КУТКИНА

Л.М.ФЕДОРОВА

Графика, верстка:

А.В.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

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

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

E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 18.09.2013
Формат 60×88 1/8
Офсетная печать
Заказ 1679
Набрано и сверстано в редакции

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

www.ras.ru/publishing/nature.aspx

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.