

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

3 17



Главный редактор
академик, доктор физико-математических наук **А.Ф.Андреев**

Заместитель главного редактора
доктор физико-математических наук **А.В.Бялко**

доктор биологических наук **А.С.Апт**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Арискин**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **П.И.Арсеев**, **О.О.Астахова**, доктор биологических наук **Ф.И.Атауллаханов**, член-корреспондент, доктор юридических наук **Ю.М.Батулин**, доктор биологических наук **Д.И.Берман**, доктор биологических наук **П.М.Бородин**, **М.Б.Бурзин**, доктор физико-математических наук **А.Н.Васильев**, член-корреспондент, доктор филологических наук **В.И.Васильев**, кандидат биологических наук **М.Н.Воронцова**, доктор физико-математических наук **Д.З.Вибе**, кандидат физико-математических наук, доктор биологических наук **М.С.Гельфанд**, академик, доктор физико-математических наук **С.С.Герштейн**, профессор **А.Глухов** (**A. Glukhov**, США), академик, доктор физико-математических наук **Г.С.Голицын**, доктор химических наук **И.С.Дмитриев**, кандидат биологических наук **С.В.Дробышевский**, академик, доктор физико-математических наук **Л.М.Зеленый**, академик, доктор биологических наук **Н.А.Зиновьева**, академик, доктор биологических наук **А.Л.Иванов**, профессор **Т.Йованович** (**T. Jovanović**, Сербия), доктор биологических наук **С.Л.Киселев**, кандидат географических наук **Т.С.Клювиткина**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **М.В.Ковальчук**, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, профессор **Е.Кунин** (**E. Koonin**, США), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Леин**, член-корреспондент, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов** (**Sh. Mitalipov**, США), доктор геолого-минералогических наук **Т.К.Пинегина**, доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, кандидат географических наук **Ф.А.Романенко**, академик, доктор физико-математических наук **А.Ю.Румянцев**, член-корреспондент, доктор биологических наук **Н.И.Санжарова**, доктор физико-математических наук **Д.Д.Соколов**, кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина**, кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина**, **Н.В.Ульянова**, академик, доктор физико-математических наук **Л.Д.Фаддеев**, академик, доктор биологических наук **М.А.Федонкин**, академик, доктор физико-математических наук **А.Р.Хохлов**, академик, доктор физико-математических наук **А.М.Черепашук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибасев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Ярошевский**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Насекомое голденбергия, представитель древнего отряда палеодиктиоптер, пролетает над лесом начала пермского периода в поисках семязачатков птеридоспермов.

См. в номере: **С.В.Наугольных**. *Взаимодействие растений с насекомыми: палеозойская история.*

Рисунок автора

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Мыс Бурхан на западном побережье о.Ольхон. Вид с озера.

См. в номере: **В.Д.Мац**, **И.М.Ефимова**. *Геологическая история Байкала.*

Фото И.М.Ефимовой



«Наука»

В НОМЕРЕ:**3 Б.М.Болотин****Перья жар-птицы**

Люминесцентные источники света служат нам уже больше полувека, а с появлением все новых и новых органических люминофоров сфера их применения продолжает расширяться.

13 В.Д.Мац, И.М.Ефимова**Геологическая история Байкала**

Многолетние комплексные исследования позволили в значительной степени раскрыть геологическую историю Байкала и его горного окружения и продолжить процессы их формирования до 70–60 млн лет назад (позднего мела).

28 А.М.Фархутдинов, С.В.Черкасов, М.Ш.Минцаев, А.А.Шаипов**Термальные подземные воды Чеченской Республики: новый этап использования**

В условиях неуклонного сокращения традиционных ресурсов значительное внимание уделяется возобновляемым источникам энергии, среди которых большое значение имеют термальные подземные воды.

36 С.В.Наугольных**Взаимодействие растений с насекомыми: палеозойская история**

С момента своего появления наземные растения оказались тесно связанными с различными членистоногими, прежде всего насекомыми. Уникальный палеонтологический материал иллюстрирует становление взаимоотношений, связанных с питанием и защитой от поедания, с опылением, а также с мимикрией насекомых и сохранностью их яйцекладок.

47 В.Е.Панчук, В.Г.Клочкова**Техника спектроскопии звезд — первые 200 лет**

Развиваясь, спектроскопия звезд помогла понять, что земной мир и Вселенная едины по химическому составу. Поскольку метод остается важнейшим средством измерений в астрофизике, его совершенствование продолжается, и в ближайшее десятилетие можно ожидать принципиальных технических новшеств.

57 Е.Н.Черных**Археология и история: хронологическо-методологический диссонанс родственных наук**

В создании целостной картины развития человечества участвуют две тесно переплетенные между собой дисциплины — история и археология. Они отличаются друг от друга по хронологическому охвату, имеют разные источники данных и арсенал методов. Диссонанс между этими науками в последние десятилетия нарастает буквально на глазах.

Научные сообщения**65 Г.А.Сафьянов, Г.Б.Рязанцев****Россыпи радиоактивных песков в эстуарии реки Варзуги (Белое море)****Времена и люди****69 Г.И.Любина****А.Ф.Слудский — первый директор Карадагской научной станции****Наука и общество****80****О лженаучности гомеопатии**
Меморандум Комиссии по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований при Президиуме Российской академии наук**82****Новости науки**

Манипулирование абрикосовскими вихрями с помощью лазера. И.С.Вещунов (82). Как можно без потерь передавать сигнал в оптическом компьютере? А.А.Пухов, А.А.Зябловский, Е.С.Андреев (83). Лазерное дистанционное зондирование температуры водной поверхности. С.М.Першин, А.Ф.Бункин, В.Н.Леднев, М.Я.Гришин (84). По следам древних землетрясений в Горном Алтае. Е.В.Деев, А.П.Бородавский (86).

89**Новые книги****В конце номера****92 В.И.Иванов-Омский****Подсказка Пьера Кюри: об открытии отрицательной люминесценции**

CONTENTS:

3 B.M.Bolotin

The Firebird's Feather

Luminescent light sources have been serving us for more than half a century, and their field of application continues to extend with the introduction of new organic luminophores.

13 V.D.Mats, I.M.Yefimova

Geological History of Lake Baikal

Long-standing integrated studies allowed to reveal geological history of Baikal and its mountain surroundings considerably and to extend their forming to 70–60 million years ago (Late Cretaceous).

28 A.M.Farkhutdinov, S.V.Cherkasov, M.Sh.Mintshev, A.A.Shaipov

Geothermal Waters of the Chechen Republic: New Stage of Usage

Due to the steady reduction in traditional resources, considerable attention is focused on renewable energy sources, very important of which are geothermal waters.

36 S.V.Naigolnykh

Plant–Insect Interactions: Paleozoic History

Ever since the originating of terrestrial plants, they have been closely linked with various arthropods, and first of all with insects. The unique palaeontological material shows how the interactions between plants and insects appeared and developed. These interactions include trophic preferences and defense against being eaten, also pollination, mimicry and protection of eggs.

47 V.E.Panchuk, V.G.Klochkova

The Technique of Stellar Spectroscopy – First Two Hundred Years

As spectroscopy of stars progressed, it helped to realize the unity of the chemical composition of the terrestrial world and the Universe. This method is the most important for astrophysical measurements, so it continues to improve and fundamental changes in the technique are expected in the next decade.

57 E.N.Chernykh

Archeology and History: Chronological and Methodological Discord of Cognate Sciences

There are two closely related disciplines participating in the formation of holistic view of human development – history and archeology. They differ from each other in chronological scope, and they have different data sources and methods. Discord between these sciences has been growing literally in front of our eyes in recent decades.

Scientific Communications

65 G.A.Safyanov, G.B.Ryazantsev

Radioactive sand scatterings in Varzuga River Estuary (White Sea)

Times and People

69 G.I.Lyubina

A.F.Sludsky – the First Head of Karadag Scientific Station

Science and Society

80

About Homeopathy as Pseudoscience Memorandum of the Commission on Pseudoscience and Research Fraud of Russian Academy of Sciences

82

Science News

Manipulation of Abrikosov Vortices by Laser. I.S.Veshchunov (82). How to Transmit a Signal in an Optical Computer with no Losses? A.A.Pukhov, A.A.Zyablovsky, E.S.Andrianov (83). Laser Remote Sensing of Water Surface Temperature. S.M.Pershin, A.F.Bunkin, V.N.Lednev, M.Ya.Grishin (84). In the Footsteps of Ancient Earthquakes in Gorny Altai. E.V.Deev, A.P.Borodovskiy (86).

89

New books

End of the Issue

92 V.I.Ivanov-Omskij

A Clue from Pierre Curie: Discovery of Negative Luminescence

Перья жар-птицы

Б.М.Болотин

«Посмотри, как много света, а огня и дыма нету!» — восклицает Иван в сказке «Конек-горбунок». Вот так впервые сказочный герой столкнулся с люминесценцией. Сергей Иванович Вавилов много лет посвятил изучению этого явления, которое он назвал холодным светом, в отличие от горячего света, испускаемого раскаленными телами, в том числе и Солнцем — источником жизни на Земле. Горячий свет — это побочный результат: в видимое излучение превращается лишь 4–5% всей энергии. Остальное — это тепло, т.е. инфракрасное излучение. Природа не может себе позволить использовать в качестве источника света столь неэффективное излучение раскаленного тела.

За миллионы лет путем естественного отбора был создан



Борис Маркович Болотин, доктор химических наук, директор по науке и развитию фирмы «ОЛБО», почетный химик Российской Федерации. Основное направление исследований — синтез и изучение органических люминофоров.

Ключевые слова: холодный свет, органические люминофоров, области применения люминофоров.

Key words: cold light, organic phosphors, scopes of phosphors.

другой, гораздо более экономичный источник холодного света с почти 100-процентным превращением энергии химической реакции в свет. Так, если один из продуктов реакции получается в возбужденном состоянии, в основном он переходит, излучая избыток энергии. Иногда выделяющаяся при реакции энергия идет на возбуждение других молекул, находящихся рядом. Сегодня такие источники света называют *биолюминесцентными* [1, 2]. Способность к биолюминесценции обладают организмы, принадлежащие

© Болотин Б.М., 2017



Люминесценция некоторых минералов и скорпиона в ультрафиолетовом свете.

к самым разным систематическим группам: бактериям, грибам, моллюскам, насекомым. Механизм реакций, сопровождающихся свечением, различен у разных видов, однако обычно он включает в себя катализируемое ферментом люциферазой химическое превращение определенного низкомолекулярного субстрата (его называют *люциферин*ом; более общий термин *люминофор* охватывает все многообразие люминесцентных материалов с различными способами достижения возбужденного состояния). Например, всем известное свечение светлячков происходит в результате биохимической реакции окисления светлякового люциферина кислородом воздуха в присутствии аденозинтрифосфорной кислоты.

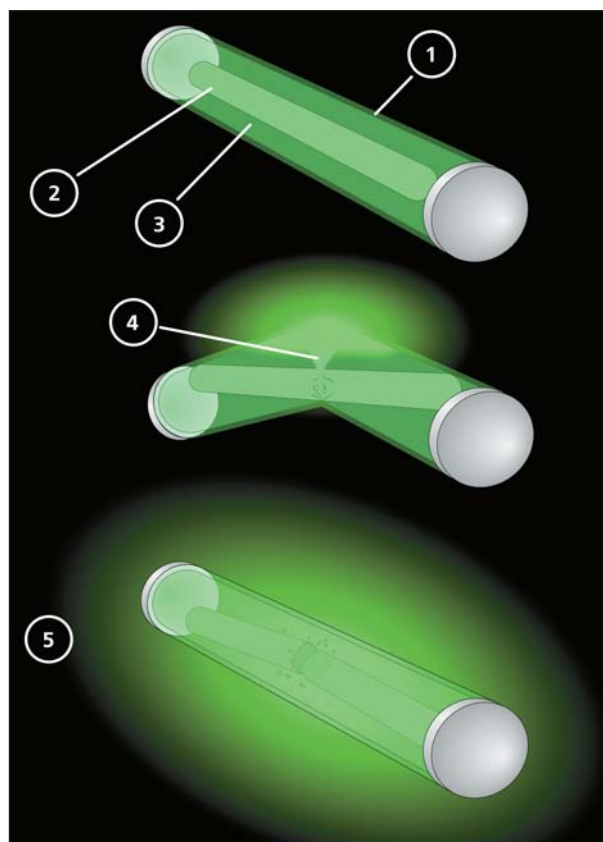
Большая семья люминофоров и ее ампула

Люди воспользовались природной люминесценцией и создали химические источники света (ХИСы) — устройства, генерирующие свет при протекании химической реакции (например, каталитической реакции некоторых эфиров щавелевой кислоты с пероксидом водорода в присутствии люминофора). ХИСы широко применяются в качестве автономных (до 12 ч свечения) источников света при различных аварийно-спасательных, дорожных, уличных работах, в чрезвычайных ситуациях, в туризме и спелеологии, в подводном плавании, для подачи сигналов, вообще в качестве различного рода резервных осветителей, в декоративном освещении, для развлечений. Будучи полностью автономными, прочными, пожаробезопасными и водонепроницаемыми, пригодными для долгого хранения, источники могут использоваться в широком диапазоне применений. Выпускаются, как правило, в виде пластиковых палочек или браслетов, которые при надламывании начинают светиться бледным светом. Излучение источников может иметь флуоресцентные оттенки различных цветов (как правило, зеленого, голубого, оранжевого). Обычно бытовые ХИСы обеспечивают освещенность около 100 люкс сразу после активирования, снижая мощность до 20–40 люкс через 10–15 мин.

К сожалению, достижения природы в области создания источников холодного света на этом кончаются — просто в других источниках не было надобности. Другое дело человек, который хочет максимально познать мир. Наибольшую часть информации (80%) мы получаем с помощью зрения, однако диапазон световых волн, воспринимаемых человеческим глазом, крайне узок: 400–700 нм. Мы не видим инфракрасного и ультрафиолетового света, не видим рентгеновского и ионизирующего излучения, не видим электронов. Тут-то на помощь и пришли люминофоры, способные преобразовывать различные виды энергии в видимый глазом свет.

Но преимущество люминофоров перед обычными красителями не только в расширении диапазона «видимости». Если черную точку на белом поле можно разглядеть на расстоянии не более 10 м, то горящую спичку ночью можно увидеть за километр. Все дело в контрасте. «Чем ночь темнее, тем ярче звезды», — гласит народная поговорка. Вот он, путь к повышению чувствительности и разрешающей способности приборов!

Появились сцинтилляторы, преобразующие в свет ионизирующее излучение. На их основе работают счетчики Гейгера и другие детекторы [3, 4]. Сцинтилляция — акт *радиолюминесценции*, механизм которой состоит из трех этапов: расхода энергии быстрой заряженной частицей в сцинтилляторе на возбуждение атомов и молекул и на образование вторичных свободных электронов, в свою очередь вызывающих ионизацию и возбуждение; передачи энергии от возбужденных и ионизированных частиц к непосредственно высвечивающим центрам (молекулам, ионам или более сложным комплексам); испускания света сцинтилляции высвечивающим центром. В счетчике име-



Устройство химического источника света: 1 — внешняя оболочка из прозрачного пластика; 2 — стеклянная капсула; 3 — раствор фенилоксалата и флуоресцентного красителя; 4 — раствор перекиси водорода; 5 — компоненты смешиваются при разламывании капсулы, начинается реакция со свечением.

ется фотоумножитель, преобразующий свет сцинтилляции в электрический импульс. По числу зарегистрированных импульсов можно определить плотность потока ионизирующего излучения, по их величине — энергию частицы.

Люминофоры для кинескопов и электронно-оптических преобразователей (*катодолюминофоры*, возбуждающим агентом для которых служит пучок ускоренных электронов), как правило, тоже имеют неорганическую природу. Разработано огромное число катодолюминофоров с разными спектрами и длительностью послесвечения. Самый яркий из них с синим свечением — ZnS-Ag (энергетический выход катодолюминесценции до 20%); для получения белых экранов он смешивается с ZnS-CdS-Ag (дающим желтое свечение). Используют также силикатные и вольфраматные люминофоры и некоторые окислы, например ZnO, CaO-Ce. Для электронно-лучевых трубок с послесвечением применяются люминесцентные композиции: 73% ZnS + 27% CdS + 0.004% Cu (нижний слой) и ZnS + 0.015% Ag (верхний слой).

Рентгенолюминофоры, возбуждаемые рентгеновскими лучами, работают в рентгеновских экранах визуального наблюдения. В качестве примера можно привести следующий состав: 58% ZnS и 42% CdS-Ag (104 г Ag на 1 г основы) с желто-зеленым свечением, соответствующим области наибольшей чувствительности глаза. Для рентгенографии используются люминофоры с синим свечением CaWO_4 , а также 90% BaSO_4 + 10% PbSO_4 .

В начале 1950-х французский ученый Андрэ Бернаноз и его сотрудники, прикладывая переменный ток высокого напряжения к прозрачным тонким пленкам красителя акридинового оранжевого, открыли эффект *электролюминесценции*. В 1960 г. исследователи из компании Dow Chemical, используя легированный антрацен, разработали управляемые переменным током электролюминесцентные ячейки. Низкая электрическая проводимость таких материалов ограничивала развитие технологии до тех пор, пока не стали доступными более современные органические материалы, такие как полиацетилен и полипиррол. В 1963 г. в ряде статей ученые сообщили о наблюдении высокой проводимости в допированном йодом полипирроле. Но только 10 лет спустя, при исследовании свойства би-стабильного выключателя на основе меланина, было обнаружено, что этот материал во время включения испускает вспышку света.

В 1990 г. в журнале Nature появилась статья, в которой сообщалось о полимере с зеленым свечением (под действием импульса электрического напряжения) и «очень высоким КПД» [5].

Наиболее полно химические структуры электролюминофоров, используемых в органических светоизлучающих диодах (OLED, Organic Light Emitting Diodes), отражены в монографии [6].

В настоящее время в мире ведутся интенсивные исследования по созданию светодиодов бело-

го свечения. Вместо сложной технологии OLED предложено использовать люминофоры желтого свечения, которыми покрывают высокоэффективные светодиоды синего свечения. Синий свет преобразуется люминофором в желтый и складывается с частично проходящим синим светом — в результате получается белый свет.

Цветовые метаморфозы

Среди известных человечеству органических люминофоров больше всего *фотолюминофоров*, возбуждаемых ультрафиолетовым светом. Этой группе соединений посвящены монографии Б.М.Красовицкого и Б.М.Болотина [7, 8].

Наибольшее количество производимых в мире органических фотолюминофоров флуоресцирует синим цветом. Это так называемые *оптические отбеливатели*. Долгие годы производителей пряжи и тканей мучила проблема отбеливания. Ткани и пряжу выкладывали на яркое солнце или обрабатывали хлорной известью. Однако из-за такого отбеливания резко ухудшалась механическая прочность. На помощь пришли физики, которые использовали закон аддитивного цветосложения. В соответствии с ним синий свет, излучаемый люминофорами, слагаясь с желтоватым цветом ткани, дает эффект белизны. На самом деле ткань как была желтой, так желтой и осталась, но при дневном освещении, когда есть ультрафиолетовый компонент, она выглядит белой. Теперь уже изготовители не только ткани и пряжи, но и фотографической и офисной бумаги стали пользоваться оптическими отбеливателями, добавляя их в бумажную массу. Не остались в стороне и производители стиральных порошков, и многие-многие другие [9].

Еще одно крупномасштабное применение фотолюминофоров — *дневные флуоресцентные пигменты* (ДФП) и изделия на их основе. При освещении любого объекта дневным (белым) светом цвет освещенного предмета определяется той частью светового потока, которую он отразил. К примеру, объект, поглотивший из белого света все цвета, кроме красного, выглядит красным. Предметы белого цвета не поглощают ничего (а в темной комнате, где освещения нет, все предметы черные). Но отразить, скажем, лучей красного света в идеальном случае можно лишь столько, сколько их содержится в белом свете. У дневных флуоресцентных пигментов часть поглощенных лучей трансформируется в люминесцентное излучение, которое, суммируясь с отраженным светом, сообщает окраскам большую интенсивность. Может случиться так, что красный ДФП испускает красных лучей в 3–3.5 раза больше, чем их содержится в дневном свете. Особенно заметен этот эффект при слабом освещении, в утренние и вечерние часы. Краски на основе ДФП пришлось по душе рыбакам (для окраски поплавков), изготови-

телям рекламы. Их используют также для уменьшения риска транспортных происшествий, окрашивая бамперы поездов и закрылки самолетов, накладки на одежду пешеходов и др.

Максимальный эффект достигается при использовании оптических каскадов. Первый компонент люминесцентной композиции поглощает ультрафиолетовые лучи и превращает их в синий свет. Второй компонент возбуждается уже не только ультрафиолетом, но и синим светом соседа, превращая и тот и другой в зеленый. Точно так же действует третий компонент, преобразуя полученный поток в желтые лучи. Наконец, четвертый компонент переводит все в красное свечение. Отсюда следует, что самыми яркими ДФП оказываются композиции оранжевого и красного цветов, а наименее яркими — синего.

Чтобы обеспечить наиболее эффективную передачу света от одного компонента оптического каскада к другому, все люминофоры растворяют в полимерной матрице. К тому же в этом случае и расход люминофоров уменьшается. Больше всего распространены ДФП на основе карбамидо- и меламиноформальдегидных смол, модифицированных одноатомными или многоатомными спиртами, а также арилсульфидами. Пигменты с использованием смол, модифицированных арилсульфидами, в большинстве случаев более яркие, легче дробятся и более светопрочные, чем пигменты на основе других смол. Тем не менее светопрочность ДФП оставляет желать лучшего: на дневном свету они выцветают уже через полгода. Для повышения светостойкости на покрытие наносят так называемые фильтр-даки, содержащие светостабилизаторы, главным образом поглотители УФ-лучей. При использовании ДФП в изготовлении гуашевых красок в качестве связующего используют карбоксиметилцеллюлозу, в темперных красках на основе ДФП — поливинилацетатную эмульсию. При получении полиграфических печатных красок связующие представляют собой сложные композиции, и в зависимости от способа печати (трафаретная, офсетная, глубокая, высокая) в них применяют различные печатные олифы, нитроцеллюлозу, минеральные масла, воск, литографский лак, канифоль и другие материалы. В красках для печати по тканям ДФП находятся в смеси с акриловой или поливинилацетатной эмульсиями.

Сигнализирует свет

Использование люминофоров в неразрушающих методах контроля (дефектоскопии) позволило совершить качественный скачок, существенно повысив чувствительность метода. Развитие авиации, ракетостроения, создание космических кораблей и других устройств, работающих в условиях больших нагрузок, предъявляют высокие требования к бездефектности отдельных деталей и узлов. По-

являющиеся трещины часто невозможно обнаружить невооруженным глазом, а применение оптических инструментов недостаточно надежно, так как, с одной стороны, нет необходимого контраста между дефектом и фоном, на котором он находится, а с другой — с помощью этих инструментов удастся увидеть лишь небольшую поверхность обследуемого участка изделия. Использование люминофоров в дефектоскопии значительно повышает контраст дефекта благодаря яркому свечению индикаторного вещества на фоне нелюминесцирующей поверхности изделия. Поверхностные микротрещины, подобно капиллярам, втягивают в себя смачивающую их жидкость. Для дефектоскопирования контролируемую деталь, предварительно очищенную от следов масла и грязи, обрабатывают индикаторной люминесцентной жидкостью (пенетрантом). Затем ее смывают (удаляют фон). Пенетрант уходит с недефектных участков, оставаясь только в полостях дефектов. Чувствительность метода повышается, когда заполнение дефектов пенетрантом производится в вакууме, что способствует дегазации трещин и лучшему проникновению в них жидкости. В качестве пенетрантов используют некоторые погоны нефти или продукты их переработки (например, нориол) либо растворы люминофоров в органических растворителях, обладающие собственной люминесценцией в желто-зеленой области спектра, наиболее чувствительной для глаза.

Широкое применение люминесцентные соединения нашли в биологии и медицине. Их применяют, когда нужно обнаружить или количественно определить вещество, содержащееся в биологическом объекте в очень низкой концентрации, или изучить очень мелкие объекты, размер которых находится на грани разрешения светового микроскопа (предел здесь — 0,2 мкм). Кроме того, глаз, адаптированный к темноте, острее видит отдельные переходы в яркости свечения различных участков объекта. При использовании простых приборов чувствительность обнаружения веществ люминесцентными методами в сотни раз выше, чем спектрофотометрическими. Люминесцентный метод с успехом применяют при определении очень низких концентраций некоторых лекарственных препаратов в крови, проходимости сосудов и т.д.

Люминесценцию используют и для изучения структуры различных биологических молекул, поскольку характеристики излучения очень чувствительны к ее изменению и изменению окружения люминесцентных центров.

Флуоресцентные белки* [10] совершили настоящий переворот в исследованиях живых клеток.

* Флуоресценцией называют быстропотекающую люминесценцию, когда возбужденное состояние сбрасывает энергию всего за 10^{-9} – 10^{-6} с, поскольку соответствующие переходы разрешены правилами отбора.

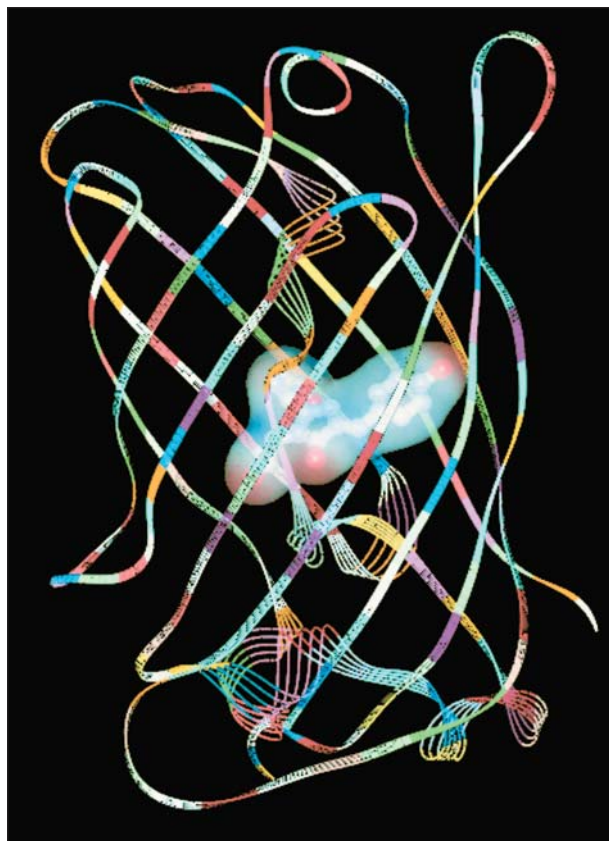


Схема строения молекулы зеленого флуоресцирующего белка. На ней видно, что молекула имеет форму бочки, внутри которой заключены аминокислоты серин-65, тирозин-66 и глицин-67, образующие хромофор.

Их используют в качестве светящихся меток при изучении не только клеток, но и живых организмов. Например, можно проследить, как в экспериментах идет синтез белков, как формируются нейронные связи, как развивается эмбрион и многое другое.

Сейчас в распоряжении исследователей имеется большой набор разных флуоресцентных генетически кодируемых маркеров и молекулярных биосенсоров, которые можно одновременно использовать для изучения процессов, происходящих с живыми клетками и с отдельными внутриклеточными белками. Эта гамма светящихся белков была бы неполной без исследований С.А. Лукьянова из Института биоорганической химии имени М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН. Начиная с 1999 г. его лаборатория открыла целое семейство GFP-подобных белков, которые светятся в желтой и красной областях.

Увидев столь обширные области применения люминофоров, читатель может подумать, что производят люминофоры очень давно. На самом деле их стали производить в годы Второй мировой войны, когда в Германии в целях маскировки названия улиц писали люминофорами. Тогда же

им присвоили торговое название — *люмогены*, т.е. носители света. Люмогенами печатали географические карты для штурманов самолетов. При ночном полете для определения места нахождения самолета глазу штурмана не надо было привыкать к темноте. Он мог сразу посмотреть и вниз, и на карту, для чего кабина летчика была снабжена источником ультрафиолетового света. Позднее панели и индикаторы других приборов в кабине, в частности определяющие угол крена и угол атаки самолета, сделали люминесцентными. Сразу же после окончания войны первые люмогены были внедрены и в СССР.

В 1964 г. в ФРГ были разработаны автоматы для сортировки почтовых отправлений. Такая сортировка требовала, чтобы почтовая марка с недефектных участков люминесцировала. Немцы предложили интересное решение. В чан с бумажной массой вводили химические вещества, которые, реагируя, образовывали люминофор прямо в этом чане. На такой светящейся бумаге и печатали марки.

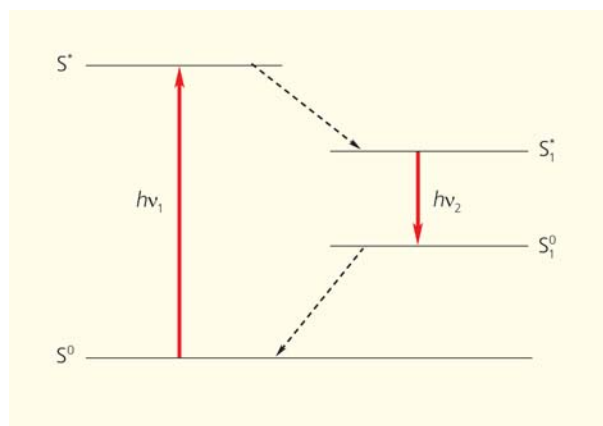
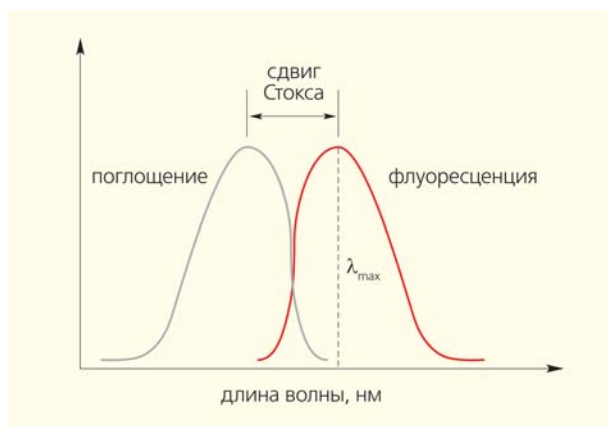
Люминофорный «проявитель»

В 1967 г. автору этих строк удалось найти новый класс органических люминофоров с аномально большим сдвигом Стокса [11, 12]. Эти соединения, будучи бесцветными при дневном освещении, люминесцируют в зеленой и желто-зеленой областях спектра.

Люминофоры с аномально большим сдвигом Стокса могут быть выделены в отдельную группу в связи со спецификой их применения. Их используют в криминалистике, для защиты ценных бумаг и промышленной продукции от фальсификации. Нанесенная с помощью подобных люминофоров метка не должна быть заметной при обычном освещении, т.е. поглощение в видимой области спектра должно отсутствовать.

Не претендуя на полноту определения, стоков сдвиг можно характеризовать как разницу между максимумом поглощения самой длинноволновой полосы и максимумом люминесценции. Стоксов сдвиг возникает в результате безызлучательных потерь, когда часть избыточной энергии возбужденного состояния сбрасывается, например, за счет тепловой релаксации. Обычно величина его не превышает 100 нм, если больше — это уже аномально много. Люминофоры с аномально большим стоковым сдвигом, если они не поглощают в видимой области спектра, имеют максимум люминесценции, который сдвинут в длинноволновую область на 500 нм. Причину столь большого сдвига можно понять из четырехуровневой схемы электронных переходов, предложенной Б.С. Непорентом.

Молекула люминофора, поглотив квант света ($h\nu_1$) и перейдя в возбужденное состояние (S^*), ме-



Стоксов сдвиг и схема, объясняющая возникновение anomalно большого сдвига Стокса.

няет свое строение. В результате спектр поглощения изменившейся молекулы претерпевает длинноволновый сдвиг и она переходит на более низкий возбужденный уровень (S_1^*). С него она испускает квант света ($h\nu_2$) и оказывается на основном, невозбужденном, уровне, но расположенном выше первоначального (S_1^0). Далее молекула возвращается к первоначальному строению (S^0). За счет

таких переходов и возникает «добавка» к стоковому сдвигу.

Механизмы фотофизических и фотохимических процессов, приводящих к большому сдвигу Стокса, описаны в [13] (см. табл.1). Авторы отдельно рассматривают механизм, включающий только физические эффекты (запрет поглощения или релаксацию в полярном растворителе), и механизм

Таблица 1

Процессы, приводящие к возникновению anomalно большого стокова сдвига

Механизм	Описание или схема	Примеры
Фотофизический процесс		
запрещенное поглощение	S_1 -поглощение, полоса очень слабая	
релаксация в среде	релаксация в полярном растворителе под действием сильно возбужденного диполя	ICT или TICT молекулы в полярном растворителе
Фотохимический процесс		
эксимер / эксиплекс		
TICT		
«бабочка»		
ESIPT		
«коршун»		

Таблица 2

Влияние заместителей на люминесцентные свойства 2-(2-тозиламинофенил)бензоксазолов

R	OCH ₃	CH ₃	Cl	Br	H	NO ₂
λ_{max} , нм	544	525	525	522	508	—

вынужденной адиабатической фотохимической реакции, приводящей к возникновению способного флуоресцировать продукта.

Некоторые механизмы, такие как эксимер/эксиплексный, TICT (Twisted Intramolecular Charge Transfer — твистованный внутримолекулярный перенос заряда) и ESIPT (Excited State Intramolecular Proton Transfer — внутримолекулярный перенос протона в возбужденном состоянии), хорошо известны уже несколько десятилетий. Например, в случае эксимер/эксиплекса образуется комплекс молекулы, находящейся в основном состоянии, с молекулой, находящейся в возбужденном состоянии, или нечто подобное, но с участием диффузионных процессов либо большой внутримолекулярной перегруппировки (в так называемом внутримолекулярном эксимере два хромофора химически объединены в одной молекуле). Образование TICT-состояния подразумевает взаимное скручивание двух хромофоров, связанных простой связью, и одновременный перенос заряда с донора на акцептор хромофора. ESIPT включает таутомеризацию, т.е. перенос протона с одной на другую часть той же молекулы (или молекулярного кластера), который обычно осуществляется путем туннелирования.

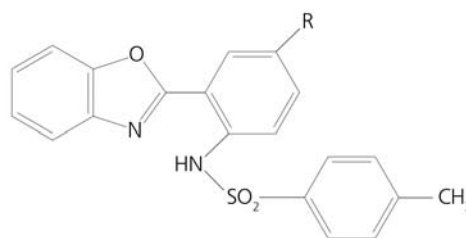
Два других фотохимических механизма («бабочка» и «коршун») исследованы меньше. Первое название дано в подражание характерному движению — здесь происходит сгибание ароматической молекулы. Хорошо известный пример — 9-трет-бутилантрацен, сгибающийся при возбуждении по 9,10-оси, образуя так называемую фотохимическую воронку (два бензольных кольца, плоскости которых находятся под углом друг к другу). После испускания кванта света восстанавливается первоначальная структура [14, 15].

«Коршун» — это деформация в плоскости хромофора. Он был изучен теоретически на примере циклобутана и его донорно-акцепторных производных. Деформация в плоскости из квадратной в несимметричную, но плоскую конформацию может привести к большому изменению в энергии в основном и возбужденном состояниях.

Практически все известные бесцветные люминофоры, обладающие аномально большим Stokes-сдвигом, работают по механизму ESIPT. Их молекулы имеют внутримолекулярную водородную связь, причем образуется квазиароматический цикл. В возбужденном состоянии происхо-

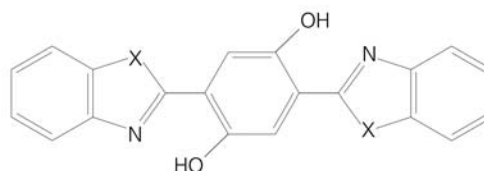
дит перемещение протона вдоль координаты водородной связи, приводящее к снижению возбужденного уровня. После испускания кванта света молекула принимает исходное строение.

Авторы работы [16], детально изучившие влияние внутримолекулярной водородной связи на люминесцентные свойства 2-(2-тозиламинофенил)бензоксазолов,



пришли к выводу, что чем прочнее водородная связь в основном состоянии, тем меньше энергии тратится на ее упрочнение при возбуждении и тем меньше Stokes-сдвиг и выше интенсивность флуоресценции. Заместители R, изменяя подвижность водорода протонодонорной группы, а следовательно, и прочность водородной связи в основном состоянии, смещают максимум флуоресценции. Электронодонорные заместители в *пара*-положении к протонодонорной группе вызывают красный сдвиг спектра флуоресценции (табл.2).

Орландо с соавторами [17] описали бис-2,5-(бензазолил)гидрохиноны,



обладающие люминесценцией в красной и ближней инфракрасной областях. Интересно, что замена водородов гидроксильных групп на метильные и исключение возможности образования внутримолекулярной водородной связи уменьшает Stokes-сдвиг на 160–300 нм (табл.3).

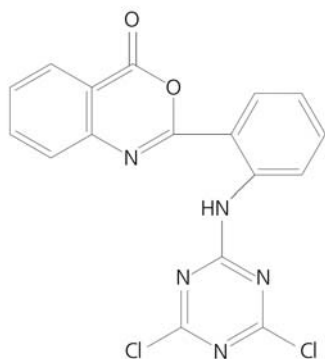
Таблица 3

Влияние гетероатома X на люминесцентные свойства твердых бис-2,5-(бензазолил)гидрохинонов

X	S	O	NH
λ_{max} , нм	680	615	730

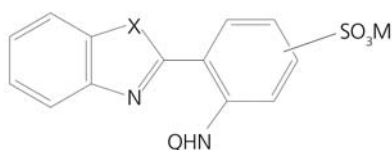
Как видно из приведенного выше материала, в качестве протонодонорных групп, участвующих в образовании внутримолекулярной водородной связи, названы гидроксигруппа и ацилированная аминогруппа.

В патенте [18] в качестве протонодонорной группы впервые предложено использовать 4,6-дихлор-1,3,5-триазилиламиногруппу.



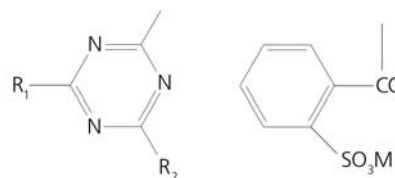
Внутримолекулярная водородная связь с участием этой группы более слабая, чем с участием ациламино- или гидроксигруппы. Это обеспечивает сдвиг люминесценции в красную область. Так, максимум люминесценции кристаллического 2-(2-трифторацетиламинофенил)-бензо[d][1,3]-оксазин-4-она расположен при 518 нм. 2-(2-гидроксифенил)-бензо[d][1,3]-оксазин-4-он люминесцирует при 535 нм, а 2-[2-(4,6-дихлор-[1,3,5]-триазин-2-иламино)-фенил]бензо[d][1,3]-оксазин-4-он — при 560 нм.

Фрагмент 4,6-дихлор-[1,3,5]-триазин-2-амин интересен также и тем, что в него можно вместо хлора вводить различные заместители, влияя таким образом на подвижность водорода аминогруппы и, следовательно, на положение максимума люминесценции. Еще более интересной оказалась возможность замены хлора на группы, придающие молекуле люминофора способность растворяться в воде. В качестве таких групп могут быть использованы сульфаниловая и метаниловая кислоты, а также аминокислотная или иминодиуксусная кислоты. Кстати, фрагмент иминодиуксусной кислоты является хелатообразующим (т.е. обладает способностью образовывать комплексы с металлами). Это открывает пути к созданию новых водорастворимых люминесцентных реагентов на ионы металлов. Авторы [19] синтезировали бесцветные при дневном освещении водорастворимые люминофоры общей формулы

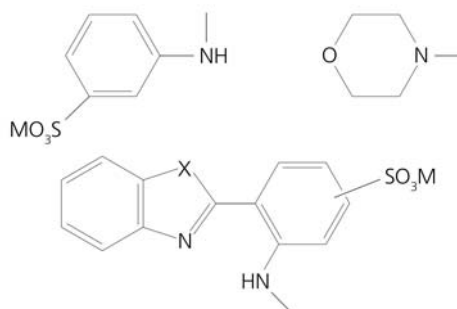


где X: O, S;

Q:



а R₁ и R₂ вместе или по отдельности (M: Na, K, NH₄):
–HCH₂COOM, –N(CH₂COOM)₂, Cl



Эти соединения предложено использовать в качестве компонентов флуоресцентных бесцветных при дневном освещении чернил для струйных принтеров или штемпельных красок при защите ценных и офисных документов.

В помощь детективам

Самый простой и эффективный способ защиты ценных бумаг и документов от фальсификации — использование в полиграфических красках органических люминофоров, которые не видны при обычном (дневном) освещении. Применение люминофоров привлекательно тем, что выявление метки не требует сложного оборудования и может осуществляться в так называемых полевых условиях. Достаточно источника ультрафиолетового света и затемненного помещения. Чем темнее помещение, тем контрастнее эффект. Однако лет 50 назад бесцветных органических люминофоров было известно очень мало, практически это были лишь люминофоры синего свечения. С широкой гаммой свечения работали неорганические бесцветные люминофоры, но у них был ряд недостатков, в том числе очень большой размер частиц (помол приводил к потере люминесцентных свойств) и высокая плотность, вызывающая быстрое оседание люминофора в краске.

Первой применила органические люминофоры для защиты ценных бумаг и банкнот британская фирма Waterlow & Sons Ltd. Затем ими воспользовалась компания Imperial Chemical Industries Ltd. Но это были лишь люминофоры синего свечения, известные теперь как оптические отбеливатели. Открытие бесцветных органических люминофоров зеленого, желто-зеленого и желтого свечения позволило предложить рецептуры



Одинаковые надписи, сделанные невидимыми флуоресцентными чернилами, под УФ-светом с разной длиной волны.



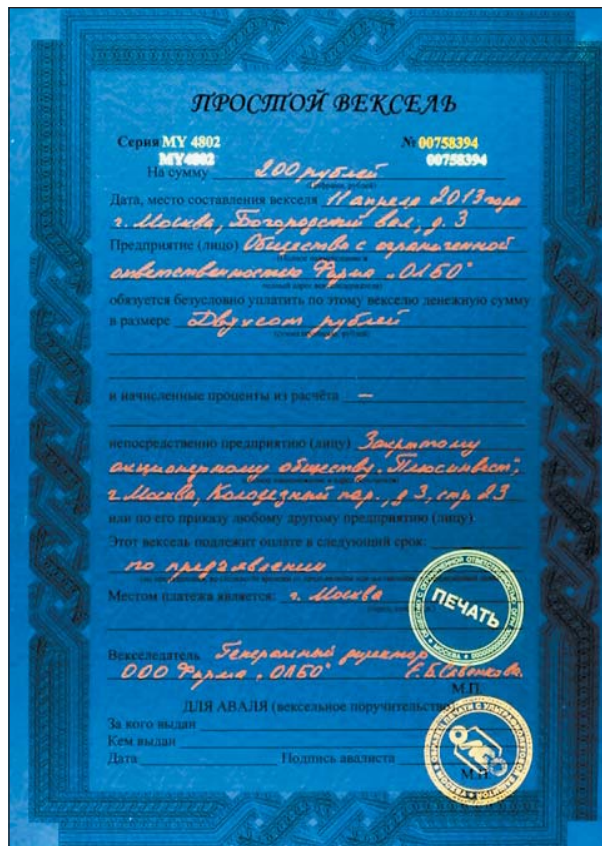
Оттиски невидимых штампов под УФ-светом.

люминесцентных печатных красок других цветов. Однако широкое применение в печатных красках люминофоры получили лишь после работ, осуществленных британской фирмой De La Rue, которые способствовали распространению люминесцентного метода защиты по всей Европе и Латинской Америке.

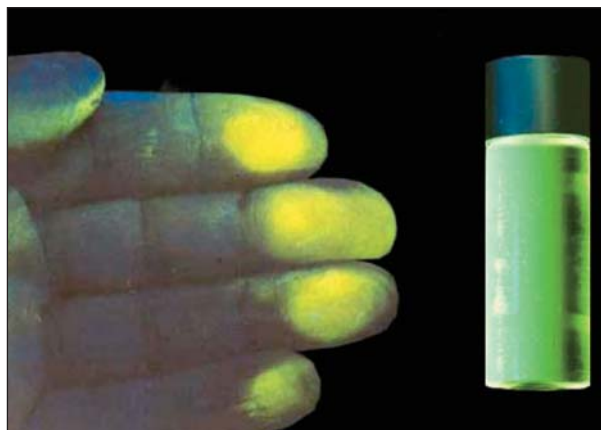
Полиграфическая продукция обычно изготавливается большим тиражом. Однако современные условия жизни диктуют необходимость защиты также и единичных экземпляров ценных бумаг и документов. Те же защищенные бланки акций, векселей, полисов могут быть похищены и заполнены похитителями. В этом случае актуальной становится защита документа уже после внесения в него всей необходимой информации. Обычно такая информация вносится вручную (мануально) — значит, и средства защиты должны быть мануальными. Таковыми могут служить люминесцентные чернила для авторучек и фло-мастеров, штемпельные краски и чернила для принтеров.

Еще одно немаловажное применение бесцветных при дневном освещении люминофоров — это использование их в криминалистике для метки взяток и наркоденок. Такие метки легко переходят с денежных купюр на руки коррупционеров в момент получения взятки.

И можно не сомневаться, что время будет лишь расширять области применения столь полезных веществ, как люминофоры. Из сообщений СМИ



Ценная бумага под УФ-светом.



Отпечатки пальцев и рука коррупционера под УФ-светом после прикосновения к меченым денежным купюрам.

видно, как часто и эффективно используются такие метки в борьбе с правонарушителями. В этом процессе есть и толика усилий нашей фирмы, которой в феврале исполнилось 25 лет. Наиболее

весомые достижения сделаны нами в области синтеза новых бесцветных при дневном освещении и растворимых в воде органических люминофоров и средств для криминалистики. ■

Литература

1. Wilson T.b., Hastings J.W. Bioluminescence: Living lights, lights for living. Cambridge; Harvard, 2013.
2. Лабас Ю.А., Гордеева А.В. Свет и цвет живых организмов. Неразгаданная Дарвином биолуминесценция // Природа. 2003. №2. С.25–31.
3. Вяземский В.О., Ломоносов И.И., Писаревский А.Н. и др. Сцинтилляционный метод в радиометрии. М., 1961.
4. Birks J.B. The theory and practice of scintillation counting. Oxford, 1967.
5. Burroughes J.H., Bradley D.D.C., Brown A.R. et al. Light-emitting diodes based on conjugated polymers // Nature. 1990. №347. P.539–541.
6. Бочкарев М.Н., Витухновский А.Г., Каткова М.А. Органические светоизлучающие диоды (OLED). Нижний Новгород, 2011.
7. Красовицкий Б.М., Болотин Б.М. Органические люминофоры, М., 1984.
8. Krasovitskii B.M., Bolotin B.M. Organic luminescent materials. Weinheim, 1988.
9. The chemistry of synthetic dyes / Ed. K.Venkataraman, N.Y.; L., 1971.
10. Лабас Ю.А., Гордеева А.В., Фрадков А.Ф. Свет и цвет живых организмов. Флуоресцирующие и цветные белки // Природа. 2003. №3. С.33–43.
11. Bolotin B.M., Kurnosova L.S., Koroljkova O.N. et al. Process of manufacturing substituted 2-(21-arylsulphonyl-1 aminophenyl)-4H,3,1-benzoxazin-4-ones. USP (Патент США) 3, 335, 137 (1967).
12. Bolotin B.M., Kurnosova L.S., Koroljkova O.N. et al. Process of manufacturing substituted benzoxazin-4-ones. B.P. (Патент Великобритании) 1, 070, 326 (1967).
13. Vollmer F., Rettig W., Birckner E. Photochemical mechanisms producing large fluorescence Stokes shifts // J. Fluorescence. 1994. V.4. №1. P.65–69.
14. Rettig W., Klock A. Intramolecular fluorescence quenching in aminocoumarines. Identification of an excited state with full charge separation // Can. J. Chem. 1985. V.63. P.1649–1653.
15. Krishnamurthy M., Phaniraj P., Dogra S.K. Absorptiometric and fluorimetric study of solvent dependence and prototropism of benzimidazole homologues // J. Chem. Soc. Perkin Trans. II. 1986. V.12. P.1917–1925.
16. Чернова Н.И., Лосева М.В., Болотин Б.М. и др. Синтез и оптические свойства 5-замещенных 2-(2-тозил-аминофенил)бензоксазолов // Химия гетероциклических соединений. 1973. №4. С.472–478.
17. Orlando C.M., Wirth J.G., Heath D.R. Red- and near-infrared-luminescent benzazole derivatives // J. Chem. Soc. Chem. Commun. 1971. №23. P.1552.
18. Бирген Е.А., Болотин Б.М., Логинов В.Ю., Яковлева Е.В. Бесцветный органический люминофор желтого свечения и способ его получения. Патент РФ 2247117.
19. Бирген Е.А., Болотин Б.М., Кукушкина М.Л., Яковлева Е.В. Colourless watersoluble organic luminophores and intermediates thereof. Европейский патент 1910351.

Геологическая история Байкала

В.Д.Мац, И.М.Ефимова

Предлагаемые заметки в сжатом изложении обобщают результаты многолетних исследований Байкальского рифта (рис.1), выполненных нами. Мы знаем его как профессионалы и любим как ценители его первозданной красоты. Поскольку здесь приведены лишь основные выводы, пришлось поместить многочисленные ссылки на собственные публикации, в которых приведены данные, обосновывающие их. Кроме того, конечно, привлечены материалы коллег, что также потребовало обширного списка использованных работ.

Байкальский рифт — самая крупная и самая древняя центральная часть Байкальской рифтовой зоны, протягивающаяся почти на 2000 км от севера Монголии (район оз.Хубсугул) до бассейна р.Алдан. Это одна из наиболее исследованных подобных структур мира, изучение которой позволяет установить многие важнейшие закономерности их строения и развития. Байкальский рифт служит тектонотипом континентального рифта. Он включает в себя впадину, в которой расположено оз.Байкал, и обрамляющие ее горные поднятия — плечи. По ним проходят внешние границы рифта. Байкал достигает глубины 1642 м и, таким образом, это глубочайшее озеро в мире, а также самый большой резервуар пресных вод, общий объем



Виктор Давидович Мац, доктор геолого-минералогических наук, профессор, долгое время работал в Лимнологическом институте СО РАН. Заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов — региональная геология юга Восточной Сибири, рифтогенез.



Ирина Михайловна Ефимова, ведущий инженер Института земной коры СО РАН. Специалист в области геоморфологии и палеогеографии Байкальской впадины.

Ключевые слова: Байкальский рифт, геологическая история, возраст, рифтовые структуры, тектонические фазы, зоогеографические связи.

Key words: Baikal rift, geological history, age, rift structures, tectonic phase, zoogeographical links.

которых составляет $23\,615\text{ км}^3$ — около 20% мировых запасов жидких пресных вод. Под его дном залегает древнебайкальская осадочная толща мощностью более 7500 м.

Рифт связан с Прибайкальской ветвью краевого шва Сибирской платформы, разделяющего ее и Саяно-Байкальскую складчатую область (рис.2). Байкальская впадина включает три впадины второго порядка: Южную, Среднюю (Центральную) и Северную (см. рис.1). Границы между ними идут по крупным сдвигам и листрическим (выползающим с глубиной) сбросам, составляющим фрагменты краевого шва.

В строении Прибайкальской ветви краевого шва различаются: зона, обращенная к складчатой области, — прискладчатая, которая располагается непосредственно над краевым швом, и приплатфор-

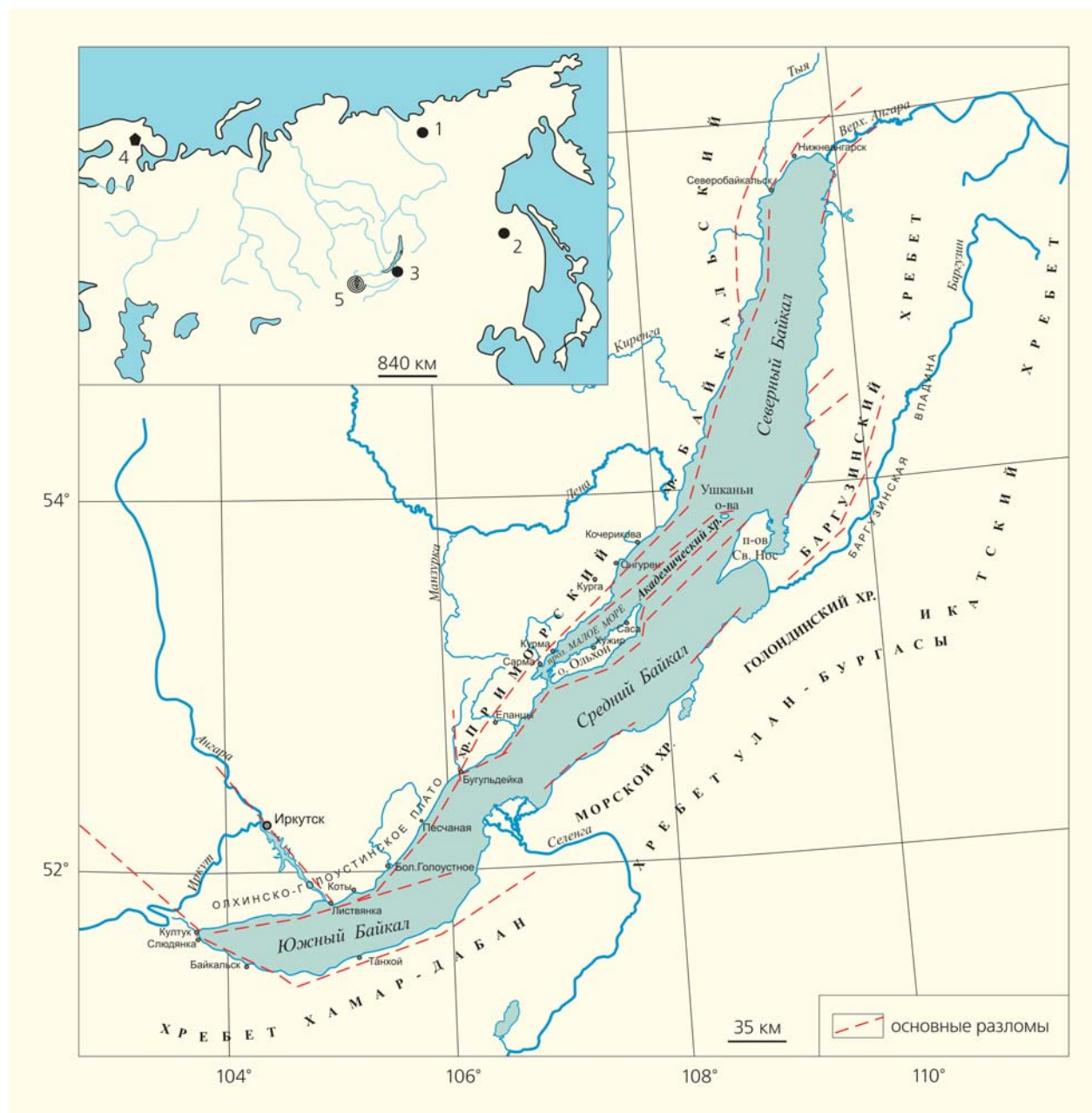


Рис.1. Обзорная карта Байкальского региона. На врезке: распространение фауны палеогеновых моллюсков, близких современным моллюскам субтропических озер Южного Китая, Индокитая и олигоценовым моллюскам байкальских местонахождений. 1 — Северное Приверхоянье, 2 — юг Дальнего Востока, 3 — Юго-Восточное Прибайкалье [1]; 4 — Восточная Скандинавия [2]; 5 — оз.Хубсугул [3].

менная. Первая служит фундаментом Южной и Центральной впадин. На границе с Северобайкальской впадиной краевой шов по диагональным разломам сдвинут к востоку, и впадина располагается на приплатформенной зоне сбоку от него. Лишь ее крайняя северная часть по поперечному сдвигу возвращается к краевому шву (см. рис.2). Прискладчатая зона сложена метаморфизованными складчатыми образованиями докембрия и нижнего палеозоя, что определяет высокую подвиж-

ность фундамента Южной и Центральной впадин. Фундаментом Северобайкальской впадины служат практически неметаморфизованные разнообразные кислые субвулканические порфиры и континентальные терригенные породы, которыми здесь «залечен» краевой шов Сибирской платформы. Указанные различия в строении фундамента определили многие особенности развития Северобайкальской впадины: ее более позднее вовлечение в рифтогенез — с миоцена (30–20 млн

лет назад). Возраст же Южной и Средней впадин исчисляется с позднего мела (70–60 млн лет назад). Мощность отложений в них достигает 7500 м, тогда как в депоцентрах Северобайкальской впадины она составляет около 3500 м. Южная и Средняя впадины выполнены тремя разными сейсмостратиграфическими комплексами: ССК-1, ССК-2 и ССК-3. В разрезе Северобайкальской впадины присутствуют лишь два последние (рис.3) [4, 5]. Со Средней и Южной впадинами связаны нефте- и газопроявления, отсутствующие (за исключением ее крайней северной части) в Северной. Наконец, эти две впадины отличаются высокой сейсмичностью, тогда как Северобайкальская практически асейсмична.

Выделение и расчленение сейсмостратиграфических комплексов основано на сейсмическом профилировании, которым определяется положение в геологическом пространстве тел с различными физическими свойствами и их взаимоотношения друг с другом и с вмещающей рамой. Сопоставляя выделенные комплексы с геологическими телами, изучаемыми традиционными геолого-геофизическими методами, устанавливают их возраст, состав и прочие характеристики. Таким образом, получают исчерпывающую характеристику геологического пространства. Решающее значение здесь имеют достоверность и точность корреляций. Ошибки, до-

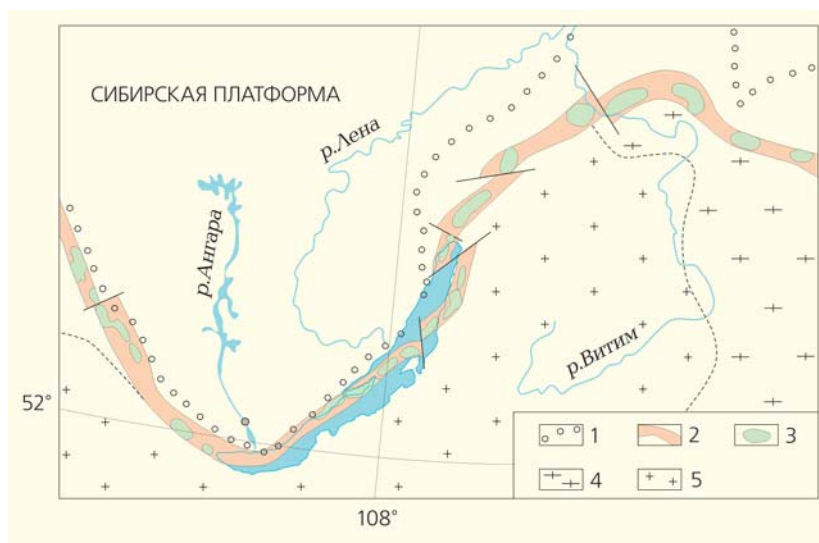


Рис.2. Краевая шовная зона в структуре юга Восточной Сибири [6]. 1 — граница рифей—палеозойского чехла Сибирской платформы, 2 — краевая шовная зона (базит-гипербазитовый пояс), 3 — участки концентрации габброидов и гипербазитов в верхней коре, 4–5 — Саяно-Байкальская горно-складчатая область: 4 — области докембрийской консолидации, 5 — области палеозойской консолидации (интенсивного гранитообразования).

пущенные при этом (например, корреляция ССК-1 с танхойской свитой), приводят к кардинальным просчетам при историко-геологических реконструкциях [7].

Установлено, что нижний ССК-1 сейсмически прозрачен и скоррелирован с позднемеловыми—раннеолигоценовыми отложениями, ССК-2 — слоистый деформированный, он сложен позднеолигоценовыми—плиоценовыми породами, а ССК-3 — слоистый недеформированный, состоит из отложений конца плиоцена — четвертичных [4, 8].

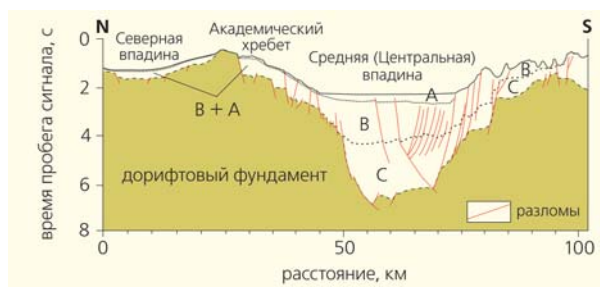
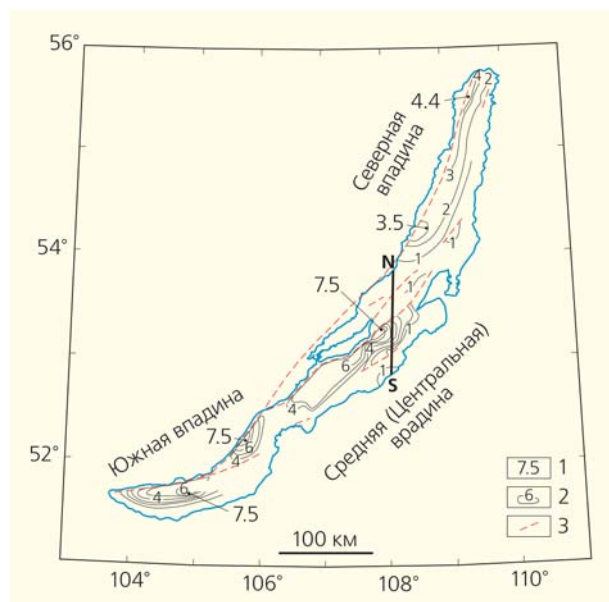


Рис.3. Строение осадочной толщи Байкала по данным непрерывного сейсмического профилирования ([4], с изменениями). Слева — карта мощностей: 1 — мощность отложений в депоцентрах (км), 2 — изопакиты, 3 — основные разломы. Справа — многоканальный сейсмический профиль NS, пересекающий Средний и Северный Байкал в районе подводного Академического хребта. Интерпретация исходных данных. А–С — сейсмостратиграфические комплексы: А — верхний слоистый недеформированный, В — средний слоистый деформированный, С — нижний, прозрачный.

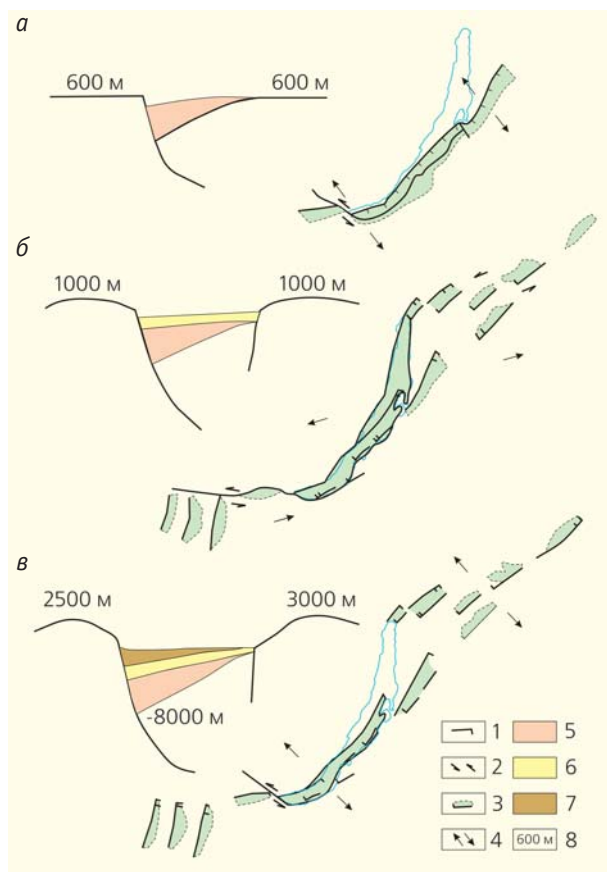


Рис.4. Развитие Байкальской рифтовой впадины [5, 8]: а — поздний мел — ранний олигоцен, б — поздний олигоцен — ранний плиоцен, в — поздний эоплейстоцен — неоплейстоцен — голоцен. 1 — активные сбросы, 2 — зоны сдвиговой деформации, 3 — активные грабены, 4 — направление раздвига; 5—7 — формации: 5 — коры выветривания (преимущественно мономиктовые продукты переотложения латерит-каолинитовой коры выветривания), 6 — нижнемолассовая (полимиктовые, преимущественно мелкоземистые отложения), 7 — верхнемолассовая (полимиктовые, преимущественно грубообломочные отложения), 8 — высота над ур. м.

Формирование Байкальской рифтовой зоны началось с позднего мела (70 млн лет назад). Развитие проходило в три этапа (рис.4).

Археобайкальский этап

В позднем мелу — раннем олигоцене (70–30 млн лет назад) в Центральной Азии господствовала обстановка всеобщего рассеянного растяжения, что определяло резкое ослабление вертикальных тектонических движений, эпизодически прерываемое их усилением [9, 10]. В связи с этим сформировался обширный пенеплен (слабо всхолмленная равнина), простиравшийся от южных широт до крайнего севера [11]. Горные преграды Центральной Азии тогда отсутствовали [12]. Эпизоды

оживления вертикальных тектонических движений обуславливали формирование крутосклонных элементов рельефа, осложнявших поверхность пенеплена. На нем в условиях жаркого влажного климата образовалась мощная каолинит—латеритная кора выветривания. Ее изотопный возраст 59.9 млн лет [13]. Развитие пенеплена определило широчайшие биогеографические связи: элементы индокитайской зоогеографической провинции и растительные пояса, свойственные южным и средним широтам, были установлены от Монголии (через Байкальский регион) до Крайнего Севера (района устья Лены) [1, 14].

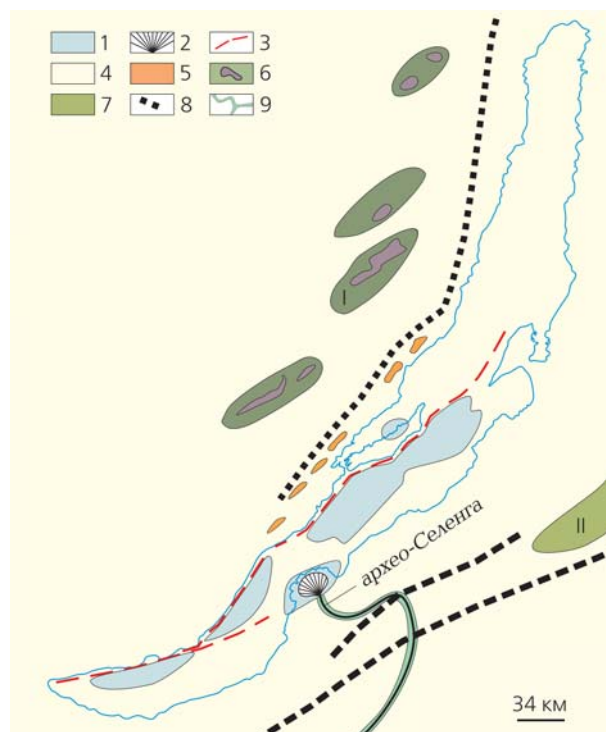
В разломной зоне краевого шва сибирской платформы общее рассеянное растяжение по азимуту юго-восток $145\text{--}150^\circ$ трансформировалось в линейное. Здесь на фоне пенеплена в результате чистого раздвига формируется щелевой рифт (см. рис.4). В зоне Южно- и Среднебайкальских впадин образовалась односторонняя впадина, ограниченная с северо-запада листрическим краевым разломом. Она заполнилась асимметричным син-рифтовым телом с прозрачным сейсмостратиграфическим комплексом ССК-1 [2, 5]. Рифтогенез протекал по модели пассивного рифтинга.

Во впадинах образовалась цепь озер глубиной до нескольких десятков метров (рис.5). Их отложения захоронены в глубинной зоне рифта и доступны непосредственному изучению лишь в единичных случаях: у западного побережья Байкала на участке от бухты Песчаная до Харгино, и в районе р.Половинки на хамардабанском побережье [15].

В бухте Песчаная благодаря уникальному стечению обстоятельств к поверхности вышли ранее скрытые под 7.5-километровой толщей донных отложений осадки волноприбойной зоны (мелкие кварц-кварцитовые галечники-гравийники) небольшого древнейшего (поздний мел — ранний олигоцен, 70–30 млн лет назад) озера. Они сначала были предсказаны [16], а затем, в 2015 г., обнаружены В.А.Фиалковым на дне Байкала в бухте Песчаная.

Появление этих отложений вблизи поверхности обязано особенностям в строении и развитии зоны краевого разлома Байкальского рифта, которая образована системой пластинообразных блоков. Восточная (привпадинная) их часть перемещалась вниз, входя в состав дна рифта. Западные блоки воздымались, формируя комплекс структур поднятого плеча рифта. При этих сложных перемещениях блоки, которые ранее входили в состав дна рифта вместе с накопившимися на них осадками, были вовлечены в поднятия и по счастливой случайности оказались вблизи современной поверхности. Этим и объясняется обнаружение древнейших отложений в районе бухт Песчаная и Бабушка. Есть еще одно место выхода на поверхность древнейших отложений — на р.Половинке. Но там они другого типа, и механизм их появления иной [15].

Рис.5. Археобайкальский этап развития Байкальского рифта (поздний мел — ранний олигоцен, 70–30 млн лет назад). 1 — глубокие озера; 2 — дельта; 3 — основной разлом; 4 — денудационное плато, низкое и слабоприподнятое, с останцовыми (мезозойскими?) возвышенностями, с формирующимися пенепленом, латерит-каолининовой корой выветривания и чехлом субазральных красноцветных глин; 5 — наклонное плато межвпадинной перемычки (краевой ступени) и внутривпадинного суходола с реликтами древних поверхностей выравнивания и кор выветривания; 6 — денудационно-аккумулятивная низменная равнина Предбайкальского периферического прогиба (I), образованная озерно-болотными депрессиями, низкими водоразделами с формирующейся мел—палеогеновой латерит-каолининовой корой выветривания и с формирующимися миоценовыми придолинными педиментами и зеленоцветной гидрослюдисто-монтмориллонитовой корой выветривания; 7 — Селенгино-Витимский прогиб (II); 8 — эскарп тектогенного уступа; 9 — речная долина.



Впадины заполнены отложениями коры выветривания в широком понимании, объединяющем собственно ее материал и осадочные толщи, которые состоят из продуктов его переотложения. Но толщи такой огромной мощности (4 тыс. м) не могут быть сложены только коровыми продуктами, к ним добавляются и размывающиеся во время эпизодов оживления вертикальных тектонических движений породы фундамента, слабо затронутые выветриванием. Примером отложений коры выветривания служат квац-кварцитовые галечники бухт Песчаная и Бабушка — бабушкинские галечники (рис.6). Примеры пород фундамента — дотанхойские олигомиктовые алевролиты р.Половинки.

Согласно молекулярно-биологическим исследованиям, впадины были заселены предковыми формами некоторых групп байкальской биоты: амфиподами, люмбрикулидами, хирономидами, моллюсками (?). Взрыв биоразнообразия на этом этапе связан с начальными событиями рифтогенеза в байкальской структуре и общими тектоническими и климатическими особенностями природы Центральной Азии [17].

В обрамлении впадин существовали слабо приподнятые пространства, где накапливались субазральные красноцветные каолининовые глины, которые сегодня можно наблюдать на Приморском хребте. Аналогичные покровные образо-



Рис.6. Южная часть бухты Песчаная (слева) и кварц-кварцитовый гравий и мелкие гальки из позднемеловых—палеогеновых отложений со дна бухты.

Фото Е.Вологиной (слева)
и В.А.Фиалкова

вания сохранились и на о.Ольхон [10, 18], где они, по данным Г.А.Покатилова, содержат окаменелости раннего олигоцена.

На прилегающих к Приморскому поднятию с запада понижениях, на месте будущей Прихребтовой депрессии, сформировалась цепь небольших впадин — Миндейской, Малоиликтинской, Анайской и др., — заполненных озерно-болотными каолиновыми глинами и брекчиями с горизонтами железо-марганцевых руд. Вдоль депрессии в юго-западном — северо-восточном направлении протекала крупная речная артерия палео-Курга, заполненная белоцветными кварцевыми песками (см. рис.5).

Вне зон седиментации формировалась каолинит-латеритная кора выветривания. Латеритные продукты представлены бокситами, минералами со свободным глиноземом, континентальными фосфоритами, Fe-Mn-скоплениями [10, 19]. Климат, необходимый для образования латерита, характеризуется наличием среднегодовых температур +20...+23°C (при июльских 27–28°C и январских не ниже 15°C) и количеством осадков 1200–1300 мм/год (по данным В.М.Синицына). Соответственно, в регионе были развиты леса с обильной растительностью южных широт, в том числе с пальмами [14, 20]. Наличие пышной растительности в совокупности с особенностями бассейнов рифта обусловили накопление значительных масс растительных остатков, сносимых с прилегающей суши. Совместно с органическим веществом, продуцируемым экосистемой озер, это послужило образованию и накоплению газ-гидратов и нефти, формированию на дне грязевых вулканов и появлению впоследствии своеобразных комплексов организмов, способных существовать в отсутствие фотосинтеза [21].

Подобные условия, характерные для первого этапа и начала второго в развитии Байкальского рифта, никогда не повторялись в последующей истории региона. Возникновение латеритных продуктов связано с климатическим оптимумом кайнозоя в эоцене (55–38 млн лет назад). Таким образом, современный морфоструктурный комплекс рифта начал формироваться на археобайкальском этапе его развития.

Первый этап отделен от второго тункинской фазой тектогенеза [8]. Ее выделение основано на общем структурном несогласии, разделяющем эти этапы [22, 23].

Протобайкальский этап

Около 30 млн лет назад, в позднем олигоцене, в байкальский регион проникли ориентированные с юго-запада на северо-восток напряжения, которые продуцировались Индоевразийским столкновением. Односторонняя рифтовая впадина первого этапа преобразовалась в двухсторон-

ний грабен, ограниченный листрическими сбросами (см. рис.4, 7). К ним примыкали опущенные участки фундамента. Развивались напряжения косого сжатия, а впоследствии — и косого растяжения, ориентированные субпараллельно простиранию рифта. Среди деформаций господствовали сдвиги [5, 24, 25]. Рифтогенез развивался под действием напряжений, возникших при «ударе» на далекой окраине литосферной плиты при Индоевразийской коллизии. Это импактогенный механизм рифтогенеза.

С середины этапа (около 10 млн лет назад) в Северобайкальскую впадину трансгрессировали воды из Южно- и Среднебайкальской впадин (см. рис.7,б). Более позднее вовлечение в рифтогенез Северобайкальской впадины связано с иным строением ее фундамента.

Впадины рифта заполнились слоистым деформированным сейсмостратиграфическим комплексом ССК-2, который подразделяется на ССК-2-1 и ССК-2-2 [26], разделенные северобайкальской тектонической фазой около 10 млн лет назад [8]. По-видимому, с этой фазой связана смена напряжений косого сжатия напряжениями косого растяжения [25].

В первой половине этапа, с миоцена, в Северобайкальской впадине в зонах понижений фундамента, примыкающих к краевым разломам, формировались области седиментации. Вдоль западного борта были распространены малые озерно-болотные бассейны, с которыми (по данным Т.Ситниковой) связано образование многочисленных местных эндемиков. Такие бассейны представлены миоценовыми (10–20 млн лет) отложениями тагайской свиты на о.Ольхон (гипсоносные глины и угли) и породами Кочериковской впадины и мио- и раннеплиоценовыми (10–3.5 млн лет) отложениями малых впадин на о.Ольхон. Вдоль восточного борта протекала речная артерия — палео-Верхняя Ангара (см. рис.7,б) [27]. В районе ее впадения в Среднебайкальскую впадину сформировалась крупная палеодельта, принадлежащая, как считали некоторые исследователи, палео-Баргузину, который впадал в Байкал через Чивыркуйский залив [26, 28]. Однако в Чивыркуе отсутствуют какие-либо следы прохождения речного водотока. Баргузинские выносы прослеживаются только в самой южной части чивыркуйского понижения и не встречаются в заливе. В действительности палеодельта образована палео-Верхней Ангарой [27]. Об этом свидетельствуют экзотические гальки в составе пляжей Северного Байкала, которые распространены от северной оконечности Байкала до самой северной оконечности п-ова Святой Нос [29].

Трансгрессирующие во второй половине этапа в Северобайкальскую впадину воды проникали через понижение в Академическом хребте, который располагался вблизи его северного окончания. Начальные порции поступающих вод скаплива-

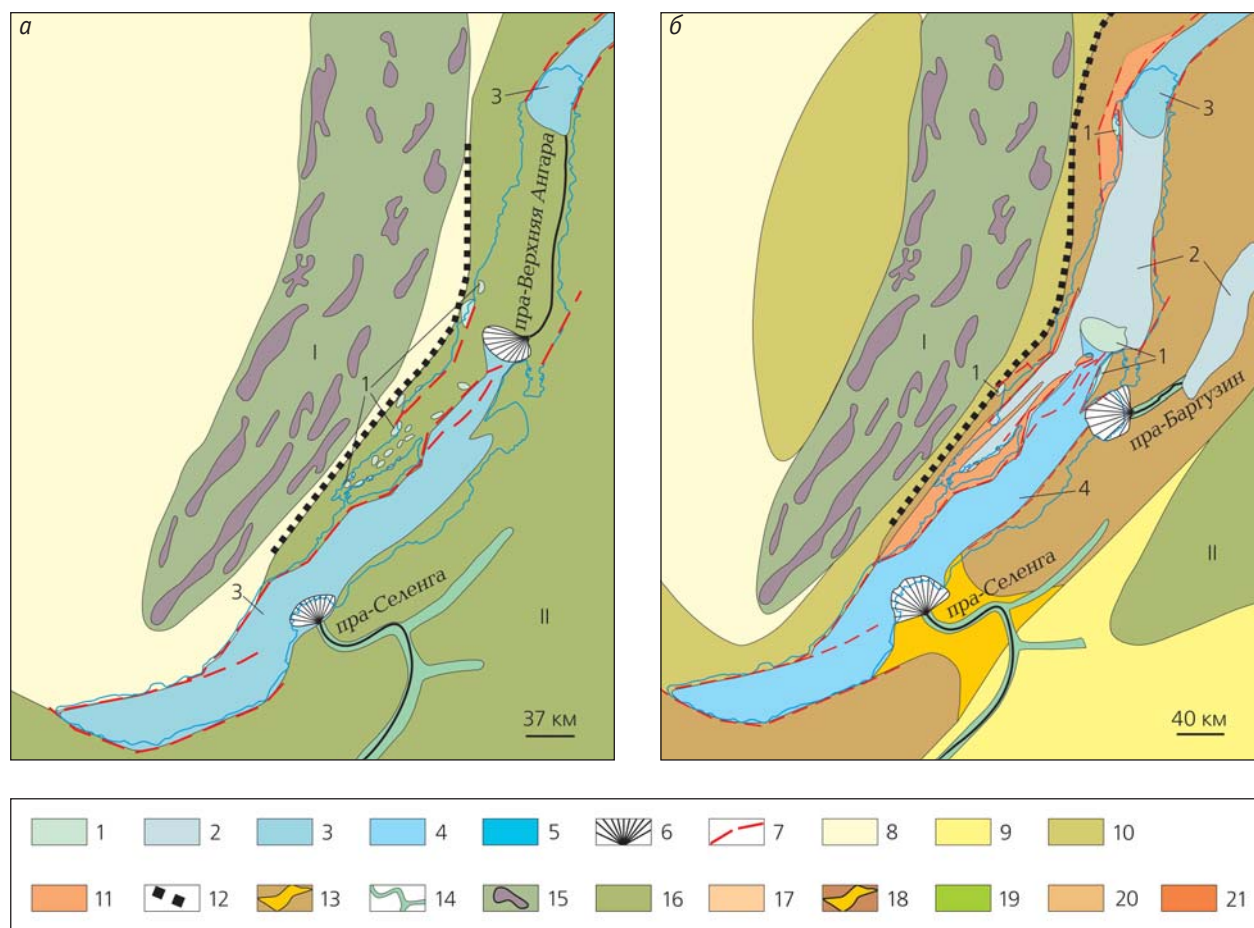


Рис.7. Протобайкальский этап развития Байкальского рифта (поздний олигоцен — ранний плиоцен, 30–3.5 млн лет назад): а — ранний подэтап (поздний олигоцен — средний миоцен, 30–10 млн лет назад), б — поздний подэтап (поздний миоцен — ранний плиоцен, 10–3.5 млн лет назад). 1–5 — озера глубиной: 1 — несколько метров, 2 — несколько десятков метров, 3 — несколько сотен метров, 4 — многие сотни метров, 5 — до 1000 м; 6 — дельта, 7 — основной разлом; 8 — денудационная возвышенная равнина; 9 — денудационное низкогорье; 10–11 денудационное плато возвышенное (10) и щитовидное поднятие (11) с реликтами позднемелового—эоценового пенеплена и связанной с ним латерит-каолиновой корой выветривания, с развивающимися придолинными педиментами и красноцветной корой выветривания; 12 — наклонное плато межвпадинной перемычки (краевой ступени) и внутривпадинного суходола с реликтами древних поверхностей выравнивания и кор выветривания; 13 — прихребтовая депрессия; 14 — речная долина; 15 — денудационно-аккумулятивная низменная равнина Предбайкальского периферического прогиба (I); 16, 17 — Селенгино-Витимский периферический прогиб (II); 18 — сводовое поднятие среднегорное (до 2000 м) с формирующимися эрозионными врезами, педиментами и красноцветной корой выветривания; 19 — аккумулятивно-денудационная равнина вырождающегося Предбайкальского периферического прогиба; 20 — денудационное среднегорье с усиливающимся эрозионным расчленением, формирующимися долинами прорыва и котловинами, педиментами, высокими террасами и красноцветной корой выветривания; 21 — растущее внутривпадинное поднятие.

лись вдоль западного краевого разлома Северобайкальской впадины. По мере развития трансгрессии воды двигались на восток, на Академический хребет и северную оконечность о.Ольхон [30]. Такой ход трансгрессии служит натурной моделью, показывающей механизм формирования несогласия растяжения.

В основании трансгрессивного комплекса (саянской свиты верхнего миоцена — нижнего плиоцена) на кристаллическом фундаменте залегает плащ грубообломочных отложений, прослеженный на дне Байкала. С течением времени транс-

грессия затопила всю Северобайкальскую впадину, включая ее верхнеангарское окончание.

Таким образом, с середины второго этапа озерные бассейны глубиной от многих десятков до многих сотен метров распространились на всю территорию Байкальской впадины (см. рис.7,б).

Краевые фации (танхойская свита верхнего олигоцена — нижнего плиоцена) бассейна Южнобайкальской впадины второго этапа обнажены на хамардабанском побережье и доступны для прямого наблюдения. Кроме того, наиболее молодая (начиная с 8 млн лет назад) часть разреза отложе-

ний второго этапа вскрыта скважинами глубоководного бурения, подтвердившими, что уже в это время в Южно- и Среднебайкальской впадинах существовал глубоководный бассейн [31, 32].

Танхойская свита хорошо изучена, что позволяет в совокупности с данными бурения достаточно полно и обоснованно судить о процессах протобайкальского этапа. Большое значение имеет корреляция сейсмостратиграфических комплексов внутренних зон рифта с танхойской свитой. Здесь злую шутку сыграло ее залегание непосредственно на фундаменте рифта — «танхойский феномен». Это привело к буквально всеобщему представлению о миоценовом (позднеолигоцен—миоценовом) возрасте Байкальского рифта (25–30 млн лет). Такое мнение было подкреплено ошибочной корреляцией танхойской свиты с нижним сейсмостратиграфическим комплексом ССК-1 [5].

Данная корреляция противоречит общей закономерности формирования синрифтовых толщ, когда (вследствие несогласия растяжения) древние элементы разреза скрыты в глубине рифта, а на поверхности фундамент перекрывают более молодые отложения (правило Хаина). Кроме того, структурные исследования показали, что ССК-1 формировался до проникновения в Байкальский регион напряжений, продуцируемых Индоевразийским столкновением, т.е. в результате чистого раздвига при напряжениях растяжения. Последние были ориентированы к юго-востоку 145–150°, вкрест простираения рифта. Танхойские же отложения образовались при напряжениях косоугольного сжатия и косоугольного растяжения, ориентированных субпараллельно рифту и обусловленных воздействием Индоевразийской коллизии, что соответствует второму сейсмостратиграфическому комплексу. Таким образом, танхойская свита коррелирует не с ССК-1, а с ССК-2, и возраст Байкальского рифта — 70 млн лет (маастрехт) [7].

Субаэральные отложения второго этапа наиболее полно изучены на о.Ольхон — инертном блоке внутри Байкальского рифта, где они представлены красноцветными суглинками, палеопочвами и образованиями неогеновой красноцветной формации. Литологические и палеонтологические данные позволяют реставрировать климатические условия сухих субтропиков средиземноморского типа. В ландшафтах тогда господствовали степи. Долины характеризовались зарослями кустарников и мелколесьем. В озерах обитали рыбы (в том числе осетровые), разнообразные моллюски, теплолюбивые диатомеи. На берега озер приходили на водопой различные виды крупных млекопитающих, среди них олени (в том числе кабарга), носороги, хищники (такие, как росомха), в степях жили разнообразные мелкие млекопитающие. В западном Забайкалье (по данным Н.П.Калмыкова) в то время в составе биоценозов присутствовали животные, характерные для юж-

ных регионов (страусы, обезьяны и др.). Это самые северные находки «южан» в Азии.

Со второго этапа начались поднятия в области плеч рифта (см. рис.7), что привело к усилению эрозии возвышений и массовому поступлению в бассейны седиментации не измененного химическим выветриванием вещества фундамента рифта. Породы танхойской свиты при общем преобладании мелкоземистых отложений (которые лишь в отдельных фациях замещаются песчано-галечными отложениями осинонской свиты) характеризуются полимиктовым составом и содержат минералы, неустойчивые к химическому выветриванию: амфиболы, пироксены, слюды и др. [16, 23, 33]. Отложения танхойской свиты представляют собой типичную нижнемолассовую формацию.

Согласно молекулярно-биологическим исследованиям, с протобайкальским этапом связано начало дивергенции семейства байкальских губок *Lumbriculidae* (30–28 млн лет назад), возникновение их некоторых видов (18–15 млн лет назад), появление амфипод родов *Eulimnogammarus* (8.5 млн лет назад), *Pallasea* (4.5 млн лет назад), эндемичных хирономид *Sergentia* и видов, личинки которых адаптированы к обитанию на большой глубине [17].

Второй этап отделен от третьего ольхонской (харамуринской) тектонической фазой, проявившейся около 3.5 млн лет назад. Она зафиксирована несогласием в основании верхнего плиоцена, характеризующимся почти повсеместным залеганием позднеплиоценовых пород краевой зоны рифта непосредственно на фундаменте. Тектоническая фаза сопровождалась сжатием и смятием в складки отложений, экспонированных в прибрежной полосе Байкала, и его донной толщи. Это существенно сказалось на условиях обитания донного населения, вызвав массовые вымирания одних видов и расцвет других.

С перерывом в осадконакоплении, обусловленным ольхонской фазой, связана кора выветривания. На Ольхонском блоке, расположенном в ветровой тени Приморского хребта, в условиях аридизации климата формировалась красноцветная кора выветривания, которая сопровождалась карбонатизацией. На хамардабанском побережье, где атмосферные массы насыщались влагой Байкала, развивались процессы дезинтеграции и каолинизации.

Палеобайкальский—байкальский этап

События третьего этапа детально изучены благодаря международным мультидисциплинарным работам, проведенным под эгидой Байкальского международного центра экологических исследований (BICER), в том числе и благодаря реализации проекта «Байкал-бурение» и продолжавшимся традиционным геологическим и геофизическим изысканиям российских ученых (рис.8).

В краевой зоне рифт датирован поздним плиоценом — кварталом (3.5 млн лет назад — ныне). Во впадинах его начало связано со сменой деформированного ССК-2 недеформированным ССК-3 (около 2 млн лет назад) и одновременной перестройкой структуры рифта — заменой двухстороннего грабена на одностороннюю впадину, ограниченную с западо-северо-запада краевым листрическим сбросом.

В то время начались радикальные преобразования всего природного комплекса Байкальского рифта. Менялись климат, рельеф, структура, характер бассейнов и осадконакопления. Сформировалось огромное разнообразие подводных ландшафтов и биотопов. Соответственно изменялись состав и характер гидробионтов. Климат на протяжении данного этапа менялся от сухого субтропического средиземноморского к умеренному и нивальному (холодному климату высокогорий). Субтропики зафиксированы накоплением субаэральных формаций Redclay и позднее (с 2.82–2.48 млн лет назад) — Reddishclay, которые описаны в разрезах на о.Ольхон. Красные глины формации Redclay включают субаэральные фации сасинской свиты (верхний миоцен — нижний плиоцен, 11–3.5 млн лет назад). Красноватые глины формации Reddishclay представлены харанцинской свитой верхнего плиоцена (3.5–1.8 млн лет назад). Граница Redclay и Redishclay отмечена значительным похолоданием, которое, по данным глубоководного бурения, может быть датировано временем 2.82–2.48 млн лет назад. Предполагалось, что с этим похолоданием связано древнейшее оледенение в Байкальском регионе [32]. Однако изучение разрезов на околобайкальской суше не позволяет согласиться с этим выводом и свидетельствует о приуроченности данного оледенения к более позднему (1.75–1.45 млн лет назад) похолоданию.

Отложения красноцветных формаций Redclay и Reddishclay включают различные типы палеопочв и богато охарактеризованы остатками моллюсков, мелких и крупных млекопитающих, что позволяет реставрировать соответствующие климатические условия. С начала плейстоцена (1.8 млн лет назад) субтропический климат сменился умеренным, а позднее — нивальным, сопровождавшимся горно-долинным оледенением [18, 34, 35]. По материалам бурения, оледенение датировано 1.75–1.45 млн лет [32].

С 3.5 млн лет назад начался энергичный рост Байкальского свода, во многом опережающий эрозионно-денудационные процессы. Это привело к смене преимущественно мелкоземистых отложений нижней молассы грубообломочной верхней молассой (см. рис.8).

Сводовобразование стало морфоструктурной реакцией на подъем вещества разогретой мантии под рифтовой зоной. Растекание вязких масс глубинного диапира (плюма) по подошве литосферы создавало гравитационную неустойчивость и под-

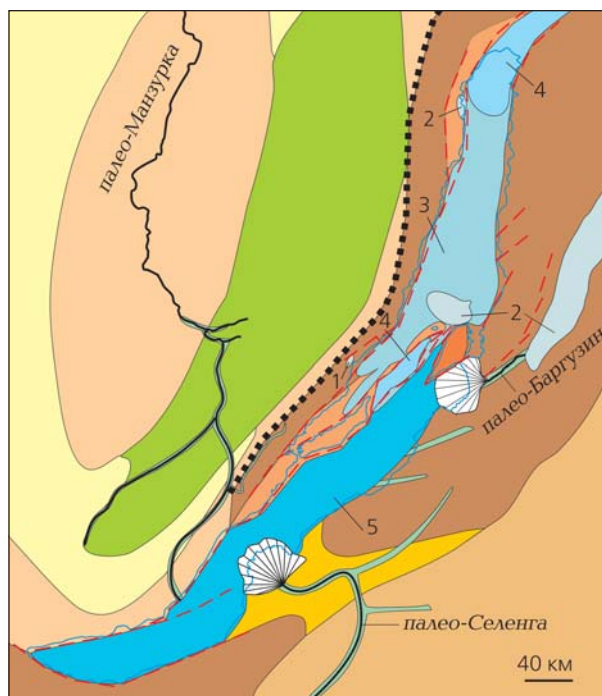


Рис.8. Палеобайкальский—байкальский этап развития Байкальского рифта (от позднего плиоцена — раннего плейстоцена, 3.5–1.6 млн лет назад). Смотри легенду на рис.7.

держивало растяжение в северо-западном направлении, вовлекая в него надлитосферную жесткую оболочку [36, 37]. Около 3 млн лет назад воздействие астеносферного выступа преодолело действие напряжений, продуцируемых Индоевразийской коллизией, и превратилось в доминирующий геодинамический фактор [38]. Тектонические напряжения были аналогичны тем, которые определяли образование рифтовых впадин на первом этапе. Вновь стали формироваться односторонние асимметричные впадины, ограниченные с запада (северо-запада) листрическим краевым разломом [5].

Третий этап тектоническими фазами — нюрганской (2 млн лет назад), приморской (1.0 млн лет назад) и тыйской (0.15–0.12 млн лет назад) — расчленен на подэтапы. Выражением нюрганской фазы служит деформация верхнеплиоцен—нижнеоплейстоценовых отложений, распространенных на околобайкальской суше. В разрезе донных осадков нюрганская фаза отмечена несогласием В-10, которое разделяет деформированный ССК-2 и недеформированный ССК-3 [28]. Таким образом, морфоструктурная перестройка, которая характеризовалась ростом Байкальского свода и последовавшей вследствие этого сменой нижней молассы грубообломочными отложениями верхней молассы, произошла в ольхонскую фазу. Последняя началась более чем на миллион лет раньше перестройки структур во внутренних частях впадин, которая была связана с нюрганской фазой.

Приморская тектоническая фаза вызвала ускоренное поднятие западного плеча рифта и прерыв в накоплении донных отложений длительно-стью около 200 тыс. лет (в интервале 0.82–1.0 млн лет) [39]. Поднятия привели к разрыву палео-Манзурского стока вод Байкала в Лену. В связи с этим начались подъем уровня озера до примерно 120 м над современным уровнем Байкала и формирование молодых высоких террас в береговой зоне. Возник новый сток вод Байкала через Иркутно-Ильчинскую древнюю долину в бассейн Енисея [40], и произошла их ингрессия в Баргузинскую, Усть-Селенгинскую и другие впадины-сателлиты, прилегающие к Байкальской. В это же время сформировалась толща четвертичных песков, широко распространенных на восточных побережьях [41, 42]. Около 60 тыс. лет назад произошло погружение Листвянского тектонического блока и образовался Листвянский залив. Открылся вход в тектоническую долину притока палео-Ангара. Так возник новый современный канал стока вод Байкала, что привело к осушению палео-Иркутского стока и снижению уровня Байкала более чем на 100 м [40].

С ольхонской и последующими тектоническими фазами связаны также деформации тальвега

долины палео-Манзурки и изменение общего направления водотоков на западном плече рифта (в Западном Прибайкалье). Ранее водотоки следовали к северо-востоку, в соответствии с простиранием структур фундамента, а позднее они развернулись на северо-запад, подчиняясь общему уклону поверхности растущего байкальского свода.

Тыйская тектоническая фаза установлена по разрыву и смещению на высоту около 200 м отложений 80-метровой байкальской террасы по бортовому разлому Байкальской впадины в районе мыса Тья (г.Северобайкальск). Возраст террасы (по палеонтологическим данным Н.П.Калмыкова) — вторая половина среднего плейстоцена. Близкие соотношения можно наблюдать и в районе села Черноруд в Приольхонье.

Тыйская фаза — самая молодая из значительных по амплитуде фаз Байкальского рифта. Она вновь активизировала поднятие плеч рифта и опускание дна Байкальской впадины. В результате озеро достигло современных экстраординарных глубин, а горное обрамление — современных высот (рис.8, 9). Изменения глубин бассейна с начала палеобайкальского—байкальского этапа приводили к появлению глубоководных биотопов и глубоководной фауны: Cottidae (2.8–1 млн лет назад), Abissocotidae, и началу дивергенции голомянковых рыб (0.8–0.15 млн лет назад).

Поднятие плеч рифта интенсифицировало эрозионно-денудационные процессы, что привело к массовому уничтожению древних элементов рельефа и возникновению новых. Формировался альпинотипный и гольцовый рельеф бортовых поднятий, и одновременно увеличивалась глубина Байкальской впадины. Вдоль подножия западных бортовых поднятий образовался подгорно-верный комплекс отложений и форм рельефа. В устьях притоков возникли конусы выноса, сложенные грубообломочным материалом, которые в виде мысов вдавались в акваторию. Строение конусов выноса отражает этапность тектонических движений. В промежутках между конусами вдоль подножий склонов накапливалось существенно мелкоземистое вещество.

Со сменой каменистых и песчаных отложений прибрежных зон связаны различные группы гидробионтов. Причем на камнях неодинакового петрографического состава (по данным О.А.Тимошкина) избирательно

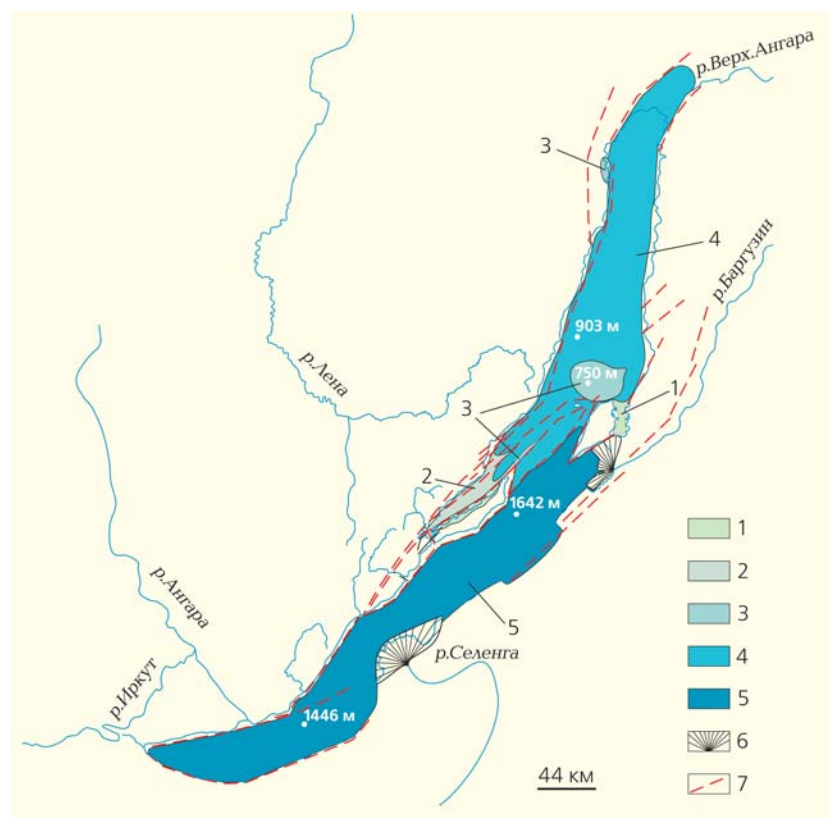


Рис.9. Байкальская рифтовая впадина в итоге тыйской фазы тектогенеза (поздний плейстоцен — голоцен, 0.13 млн — ныне). 1–5 — озера глубиной: 1 — несколько метров, 2 — несколько десятков метров, 3 — несколько сотен метров, 4 — до 1000 м, 5 — более 1000 (максимум 1642) м; 6 — дельта, 7 — основного разлома.

расселялись разные виды. Значительная часть терригенного вещества поступала в бассейн с мутьевыми потоками, сходящими по узким поперечным долинам (подводным каньонам) через зону грубообломочных отложений. Достигнув глубоководной равнины, мутьевой поток растекался по широкой площади илов, что приводило к захоронению и мгновенной гибели донного населения этой фациальной зоны, тогда как население фации каменистых отложений данным процессом не затрагивалось. Такой сценарий избирательной гибели бентоса илов при сохранности бентоса камней примерно 16 тыс. лет назад прослежен у амфипод *Gmelinoides faciatius* вдоль побережья Байкала на участке от Ольхонских ворот до Култук.

В связи с усиливавшимся ростом Байкальского свода началась перестройка речной сети, байкальские водотоки перехватывали верховья рек Лены и Витима, что, в частности, привело к появлению ленских форм хариусов в бассейне Байкала [43]. В Западном Прибайкалье перехваты были реализованы на реках Бугульдейке, Анге, Сарме. В геологически скором времени по долине Солнце Падь было перехвачено и повернуто в Байкал самое верховье Лены (рис.10).

С начала палеобайкальского этапа в береговой зоне формировались участки уходящих в воду субвертикальных тектонических скальных откосов. Они образовали зоны непропусков вдольберегового потока наносов, которые разрывали ранее единые популяции гидробионтов. Например, ангарский исток, образовавшийся около 60 тыс. лет назад, разделил ранее единую популяцию *Eulimnogammarus yaneus* на право- и левобережную [44]. В конце плиоцена (1.8–1.6 млн лет назад) отмечены первые в регионе глубокие похолодания, а 1.75–1.45 млн лет назад начались горно-долинные оледенения, периодически сменявшиеся межледниковьями. Это глубочайшим образом сказалось на всех компонентах природного комплекса.

В ледниковья снижался уровень Байкала. Но его поверхность не превратилась в сплошной ледовый панцирь, о чем свидетельствуют следы айсбергового разноса льдов и наличие в донных отложениях друпстоунов — валунов и глыб корен-

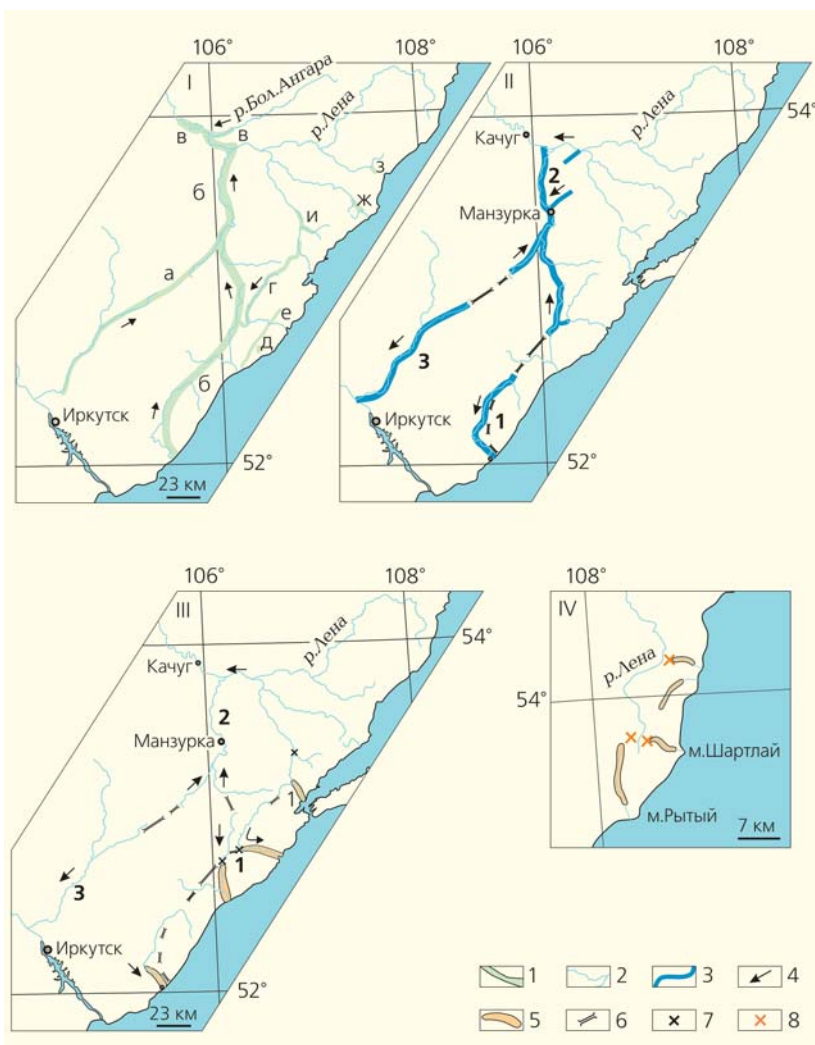


Рис.10. Перестройки речной сети в результате роста Байкальского свода. I — система р.пра-Манзурки в позднем плиоцене (3.5–1.8 млн лет назад): а — пра-Куда, б — пра-Манзурка, в — пра-Анга Ленская, г — пра-Анга Бугульдейская; система Приольхонья: д — пра-Крестовская «досводовая», е — пра-Таловская «послесводовая» (позднеплиоцен—зоплейстоценовая), ж—и — фрагменты долин неуставленного возраста: ж — Иликта-Зундукский, з — Чанчур-Онгуренский, и — Сарма-Леоиликтинский. II — распад пра-Манзурки в раннем—среднем неоплейстоцене (0.5–0.2 млн лет назад) на: 1 — притоки Байкала (р.Голоустная), 2 — Бугульдейско-Манзурскую систему притоков Лены, 3 — Кудинскую систему притоков Ангары. III — продолжение распада манзурской системы в среднем—позднем неоплейстоцене (0.2–0 млн лет назад): 1 — притоки Байкала (реки Голоустная, Бугульдейка, Анга, Сарма), 2 — приток Лены (Манзурка с Ходонцем), 3 — приток Ангары (Куда). IV — будущие преобразования верховий Лены. 1 — система пра-Манзурки, 2 — современная гидрографическая сеть, 3 — древняя долина системы Праманзурки, 4 — направление течения, 5 — юный эрозионный врез за счет попятной эрозии, 6 — брошенная долина, 7 — участок перехвата, 8 — участок будущего перехвата.

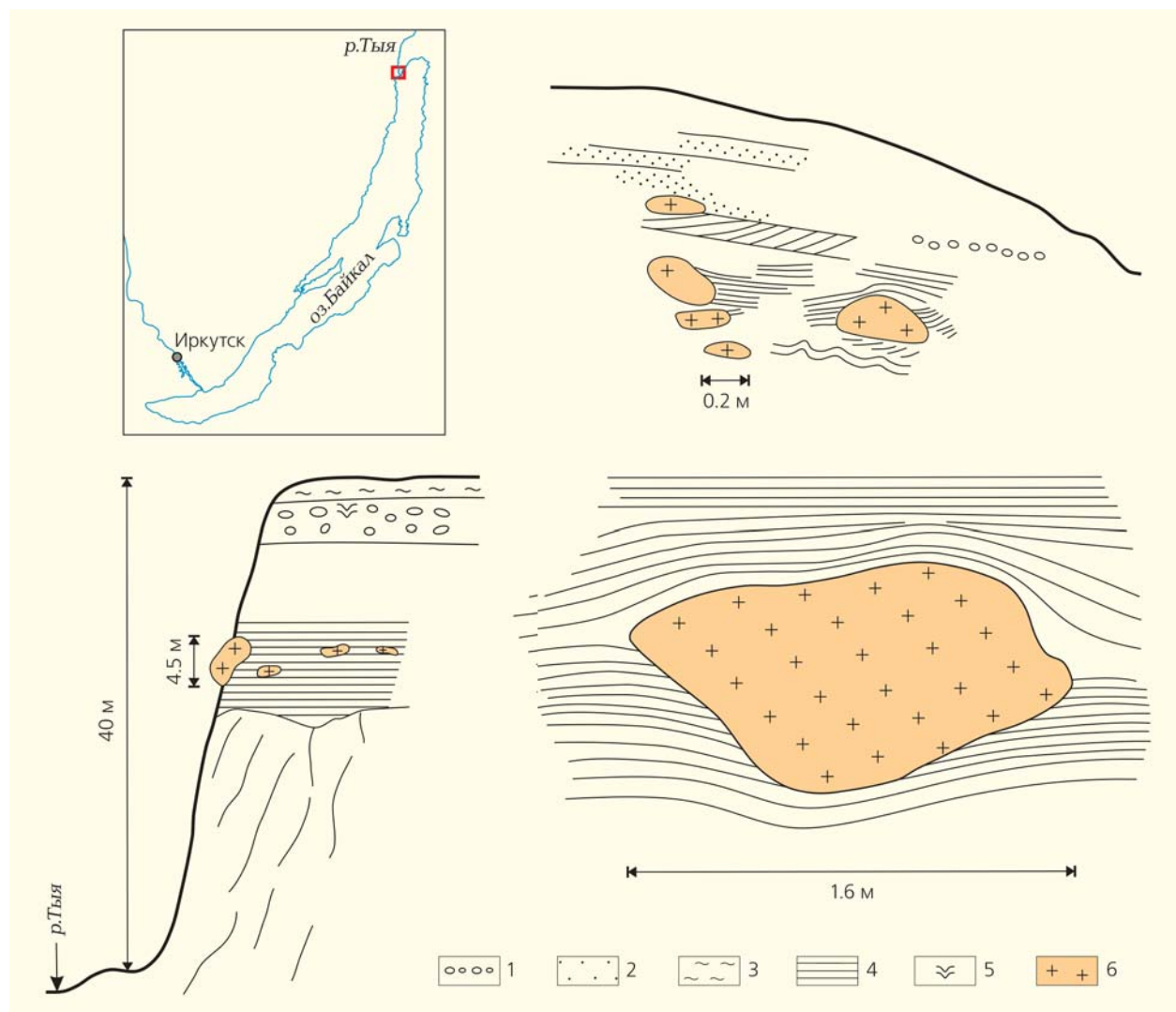


Рис.11. Ледниковые валуны (дропстоуны) в алевритах V байкальской террасы. Район мыса Тыя, Северный Байкал [16]. 1 — галечники, 2 — пески, 3 — покровные суглинки, 4 — озерные алевриты (штриховка соответствует слоистости), 5 — псевдоморфозы по ледяным жилам, 6 — гранитоиды.

ных пород, попадавших в осадки при их вытаивании из айсбергов (рис.11).

В связи с оледенениями в Западной Сибири образовались крупные озера, которые с юга ограничивались горными поднятиями, а с севера — ледниками. По ним байкальская фауна пробивалась далеко на запад, в районы Арало-Каспия. Байкальские эндемики отмечены даже в Скандинавии и Финляндии (см. рис.1). В то же время в Байкал проникла нерпа (рис.12). Однако точное время и пути ее следования окончательно не установлены.

В ледниковые эпохи в несколько раз снижалась биопродуктивность ландшафтов, уменьшалось поступление в озеро биогенных элементов. Этим обусловлены особенности состава донных отложений. В их разрезе ритмично чередуются диатомовые илы — продукт межледниковых эпизодов, и плотные глинисто-алевритовые осадки, практи-

чески лишенные остатков диатомей, — материал ледниковых эпизодов [45]. При оледенениях резко снижался объем водного стока в озеро и его уровень. Высказывается предположение о прекращении стока по долине р.Селенги, однако геологические доказательства этого отсутствуют.

Как показали гидробиологические и молекулярно-биологические исследования, с палеобайкальским—байкальским этапом связано появление большинства современных гидробионтов, а в их составе преобладали молодые формы. Так, установлено, что животные, не покидавшие дна в течение всего жизненного цикла, прошли этап ускоренной адаптивной радиации около 3.5 млн лет назад. Отмечалось массовое вымирание некоторых видов моллюсков семейства Baicaliidae, а два куста современных видов берут начало с позднего плиоцена (3–1.5 млн лет назад). Ускоренный кладогенез у ро-

да *Choanomphalus* происходил на рубеже 3,5 млн лет назад, у *Cottidae* — 2,5–1 млн лет назад, у *Comphoridae* — 1 млн лет назад, начало дивергенции голомянковых рыб и *Abissocotidae* — 0,8–0,15 млн лет назад. Эти данные отчетливо коррелируют с преобразованиями косных элементов природы [17].

Формирование Байкальского рифта не прекратилось и в современную эпоху. Современные этапы тектонического развития — неотъемлемая часть неотектонической активизации [46]. Это отчетливо прослеживается на примере Приморской разломной зоны — западного бортового ограничения Северобайкальской впадины. Ее изучение как геологического тела позволило проследить развитие данной зоны от миоцена до современности. Юное окончание Северобайкальской впадины в крайней юго-западной части представлено единичным сбросовым уступом. К северо-востоку по мере удрежнения морфоструктура все более усложняется, преобразуясь в разломно-блоковую и далее — в разломно-блоково-впадинную. Одновременно увеличивается амплитуда смещений по принципу ножниц. Прибортовые морфоструктуры при этом переходят во внутривпадинные, а субаэральные — в подводные. Такие преобразования обусловлены листрическими и шарнирными разломами.

Проследивание Приморской разломной зоны по простиранию до ее миоценовой части и далее, к северо-востоку, показывает разрастание Северобайкальской впадины в ходе эволюции прибортовых морфоструктур [47, 48].

* * *

Таким образом, многолетние комплексные исследования позволили в значительной степени раскрыть геологическую историю Байкала и его горного окружения и продлить процессы их формирования до позднего мела (70–60 млн лет назад).

В итоге преобразований природы Прибайкалья и собственно озер в Байкальской впадине сформировалось уникальное биоразнообразие байкальской биоты, которая включает разновозрастные элементы, образовавшиеся в разные геологические эпохи при различном состоянии природного комплекса. Интересно отметить, что подобное же смешение разных биот отмечается и в составе наземной растительности, в частности в составе лишайников горных систем юга Восточной Сибири: в их современной флоре присутствуют реликты тропических форм, свойственных за-



Рис.12. Байкальские нерпы.

Фото И.М.Ефимовой

сушливым субтропикам Средиземноморья, и виды, изначально присущие суровым климатическим условиям сибирских высокогорий [49].

Наиболее яркое свидетельство общенаучного значения байкальских исследований — тот энтузиазм, с которым ученые многих стран включились в совместное изучение Байкала под эгидой BICER. Это международное содружество объединило ученых России, Бельгии, Великобритании, Германии, США, Швейцарии, Японии и других стран для всестороннего обследования всех компонентов природы Байкальского региона с использованием самых передовых методов и технологий. Особо значимые проекты — «Байкал-бурение», сейсмические исследования донной толщи и работы с подводных обитаемых аппаратов «Пайсис» и с глубоководных «Миров». Важнейшим стало открытие в толще байкальских отложений скоплений нефти и горючих газов [21]. Речь не идет об их промышленной добыче, это было бы кощунственно и погубило бы Байкал, да и экономически добыча не оправдана. Значение открытия в том, что оно еще больше сближает Байкал с океаном и дает новые возможности в исследовании проблем генезиса нефти и горючих газов. Неслучайно Байкал называют пресноводным океаном.

Наряду с работами по программе BICER российские ученые продолжают комплексное изучение природы Байкальского региона, в том числе и его геологии. Научные результаты байкальских исследований широко публикуются, а бренд «Байкал» — один из наиболее встречаемых в научной литературе. Но роль Байкала не ограничивается интересами науки, он имеет огромное народно-хозяйственное и рекреационное значение. Прежде всего — как источник постоянно воспроизводимой

чистейшей питьевой воды, острый дефицит которой во многих странах мира становится критическим. В то же время отмечается все более ощутимое негативное воздействие на Байкал неорганизован-

ного «дикого туризма», а также процессов эвтрофикации [50], т.е. перенасыщения его вод биогенными элементами, которые попадают в озеро со сточными водами при недостаточной их очистке. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Иркутской области (проект *r_сибирь_а* №14-45-04163).

Литература

1. Мартинсон Г.Г. Палеогеновый этап развития крупных озер Северо-Восточной Азии и их малакофауна // Геология и геофизика. 1998. Т.39. №3. С.276–286.
2. Vainola R., Kontula T., Kamaltynov R.M. Use of mitochondrial DNA and allozyme characters to explore the systematic diversity of Baikal Lake amphipods (genus *Pallasea*) // Biodiversity and Dynamics of Ecosystems in North Eurasia. 2000. V.5. Part 1–2. P.204–206.
3. Papoucheva E., Proviz V., Lambkin C. et al. Phylogeny of the endemic Baikalian *Sergentia* (Chironomidae, Diptera) // Molecular Phylogenetics and Evolution. 2003. V.29. P.120–125.
4. Хатчинсон Д.Р., Гольмшток А.Ю., Зоненишайн Л.П. и др. Особенности строения осадочной толщи озера Байкал по результатам многоканальной сейсмической съемки // Геология и геофизика. 1993. Т.34. №10–11. С.25–36.
5. Зоненишайн Л.П., Казьмин В.Г., Кузьмин М.И. Новые данные по истории Байкала: результаты наблюдений с подводных обитаемых аппаратов // Геотектоника. 1995. №3. С.46–58.
6. Алакишин А.М., Письменный Б.М. О строении земной коры зоны сочленения Сибирской платформы со складчатым обрамлением // Геология и геофизика. 1988. №11. С.24–31.
7. Мац В.Д. Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) — четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т.6. №4. С.467–489.
8. Мац В.Д. Возраст и геодинамическая природа осадочного выполнения Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2012. Т.53. № 9. С.1219–1244.
9. Замаев С.М., Адаменко О.М., Рязанов Г.В. и др. Структура и история Предбайкальского предгорного прогиба. М., 1976.
10. Мац В.Д., Ефимова И.М. Морфоструктура поднятого западного плеча Байкальского рифта // Геоморфология. 2010. №1. С.67–76.
11. Цеховский Ю.Г., Муравьев В.И., Музылев Н.Г., Ахметьев М.А. Раннекайнозойское осадконакопление на древних и молодых платформах центральной части Евразии в обстановке растяжения земной коры и пенепленизации рельефа // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1996. Т.71. Вып.1. С.14–26.
12. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Горообразующие процессы и варианты климата в истории Земли // Геология и геофизика. 2006. Т.47. №1. С.7–25.
13. Логачев Н.А., Бранд И.С., Рассказов С.В. и др. Определение К-Аг-возраста палеоценовой коры выветривания Прибайкалья // Докл. АН. 2002. Т.385. №6. С.648–650.
14. Волкова В.С., Кузьмина О.Б. Флора, растительность и климат среднего кайнофита (палеоцен, эоцен) по палинологическим данным // Геология и геофизика. 2005. Т.46. №8. С.844–855.
15. Мац В.Д. Стратиграфия отложений позднего мела—кайнозоя Байкальского рифта // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2013. Т.21. №6. С.72–81.
16. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск, 2001.
17. Мац В.Д., Щербаков Д.Ю., Ефимова И.М. Позднемеловая—кайнозойская история Байкальской впадины и формирование уникального биоразнообразия Байкала // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2011. Т.19. №4. С.40–61.
18. Мац В.Д., Покатилов А.Г., Попова С.М. и др. Плиоцен и плейстоцен Среднего Байкала. Новосибирск, 1982.
19. Гранина Л.З., Мац В.Д., Федорин М.А. Железомарганцевые образования в регионе озера Байкал // Геология и геофизика. 2010. Т.51. №6. С.835–848.
20. Павлов С.Ф., Кашик С.А., Ломоносова Т.К. и др. Кайнозойские коры выветривания и осадочные формации Западного Прибайкалья. Новосибирск, 1976.
21. Конторович А.Э., Каширцев В.А., Москвин В.И. и др. Нефтегазоносность отложений озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т.48. №12. С.1346–1356.
22. Логачев Н.А. Саяно-Байкальское Становое нагорье // Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М., 1974. С.16–162.
23. Рассказов С.В., Лямина Н.А., Лузина И.В. и др. Отложения Танхойского третичного поля, Южнобайкальская впадина: стратиграфия, корреляции и структурные перестройки в Байкальском регионе // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т.5. №4. С.993–1032.

24. Балла З.К., Кузьмин М.И., Леви К.Г. Кинематика раскрытия Байкала // Геотектоника. 1990. №2. С.86–91.
25. Delvaux D., Moyes R., Stapel G. et al. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region Central Asia. Part II. Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. V.282. P.1–38.
26. Казьмин В.Г., Гольмшток А.Я., Клитгорд К. и др. Строение и развитие района Академического хребта по данным сейсмических и подводных исследований (Байкальский рифт) // Геология и геофизика. 1995. Т.36. №10. С.164–175.
27. Мац В.Д., Ефимова И.М. Палеогеографический сценарий позднего мела-кайнозоя центральной части Байкальского региона // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т.2. №2. С.175–193.
28. Moore T.C., Klitgord K.D., Weber T. Sedimentation and subsidence patterns in the central and north basins of Lake Baikal from seismic stratigraphy // OSA Bulletin. 1997. V.109. P.746–766.
29. Мац В.Д. Байкальские террасы низкого комплекса // Природа Байкала. Л., 1974. С.31–56.
30. Мац В.Д., Фуджии Ш., Машико К. и др. К палеогидрологии Байкала в связи с неотектоникой // Геология и геофизика. 2002. Т.43. №2. С.142–154.
31. Хариуци К., Гольдберг Е.Л., Мацузаки Х., Каболяши Я. Проверка магнитостратиграфической шкалы миоценовых осадков озера Байкал // Геология и геофизика. 2004. Т.45. №3. С.408–412.
32. Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каваи Т. и др. Глубоководное бурение на Байкале — основные результаты // Геология и геофизика. 2001. Т.42. №1–2. С.8–34.
33. Мазилев В.Н., Ломоносова Т.К., Климанова В.М. Литология третичных отложений впадин юго-западной части Байкальской рифтовой зоны. М., 1972.
34. Воробьева Г.А., Мац В.Д., Шимараева М.К. Плиоцен—эоплейстоценовое почвообразование на Байкале // Геология и геофизика. 1987. №9. С.20–28.
35. Воробьева Г.А., Мац В.Д., Шимараева М.К. Палеоклиматы позднего миоцена, плиоцена и эоплейстоцена // Геология и геофизика. 1995. Т.38. №8. С.82–96.
36. Zorin Yu.A., Turutanov E.Kh. Plumes and geodynamics of the Baikal rift zone // Geologia and geophysics. 2005. V.46. №7. P.669–682.
37. Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х. Плюмы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2005. Т.46. №7. С.685–699.
38. Мордвинова В.М., Дешамп А., Дугармаа Т. Исследование скоростной структуры литосферы на Монголо-Байкальском трансекте по обменным SV-волнам // Физика Земли. 2007. №2. С.11–23.
39. Высокоразрешающая осадочная запись по керну глубоководного бурения на Посольской банке в озере Байкал (BDP–99). Проект «Байкал-бурение» / Коллектив участников // Геология и геофизика. 2004. Т.45. №2. С.163–193.
40. Кононов Е.Е., Мац В.Д. История формирования стока вод Байкала // Известия вузов. Сер. геология и разведка. 1986. №6. С.91–98.
41. Коломиец В.Л., Будаев Р.Ц. Позднеплейстоценовый аквальный морфогенез Усть-Селенгинской рифтовой впадины // Кайнозойский континентальный рифтогенез. Материалы Всероссийского симпозиума, посвященного памяти Н.А.Логачева / Ред. Е.В.Склярова, С.В.Рассказова. Иркутск, 2010. Т.1. С.177–180.
42. Коломиец В.Л., Будаев Р.Ц. Баргузинская рифтовая впадина в неоплейстоцене: Геология и история формирования осадочного чехла // Кайнозойский континентальный рифтогенез. Материалы Всероссийского симпозиума, посвященного памяти Н.А.Логачева / Ред. Е.В.Склярова, С.В.Рассказова. Иркутск, 2010. Т.1. С.173–176.
43. Книжин И.Б., Вайс С.Дж., Богданов Б.З., Копун Т. Новые данные о распространении верхнеленской формы хариуса (Thymallidae) и ее таксономическом статусе // Вопросы ихтиологии. 2008. Т.48. №2. С.166–172.
44. Mashiko K., Kamaltunov R.M., Sherbakov D.Yu., Morino H. Genetic separation of gammarid (*Eulimnogammarus cyaneus*) population by localized topographic changes in ancient Lake Baikal // Arch. Hydrobiol. 1997. V.139. P.387–397.
45. Грачев М.А., Лихошвай Е.В., Воробьева С.С. и др. Сигналы палеоклиматов верхнего плейстоцена в осадках озера Байкал // Геология и геофизика. 1997. Т.38. №5. С.957–980.
46. Саньков В.А. Современная геодинамика внутриконтинентальных областей // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т.5. №1. С.159–182.
47. Mats V.D., Lobatskaya R.M., Khlystov O.M. Evolution of faults in continental rift: evidences from the south-western termination of the north Baikal basin // Earth Science Frontiers. 2007. V.14. №1. P.207–219.
48. Мац В.Д., Лобацкая Р.М., Хлыстов О.М. Механизм разрастания Байкальской впадины в ходе эволюции прибрежных морфоструктур // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле: материалы научно-практической конференции (Листьянка, 18–20 марта 2008 г.). Новосибирск, 2008. С.141–154.
49. Седелникова Н.В. Биоразнообразие лишайников горных систем Сибири // Сибирский экологический журнал. 2002. Т.9. №5. С.541–548.
50. Timoskin O.A., Semenova D.P., Yamamoto M. et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger // J. of Great Lakes Res. 2016. P.487–497.

Термальные подземные воды Чеченской Республики: новый этап использования

А.М.Фархутдинов, С.В.Черкасов, М.Ш.Минцаев, А.А.Шаипов

В условиях неуклонного сокращения традиционных ресурсов значительное внимание уделяется возобновляемым источникам энергии, среди которых большое значение имеют термальные подземные воды. По сравнению с традиционными источниками энергии развитие геотермии обосновано рядом преимуществ: экологичностью, неисчерпаемостью, близостью к потребителю, принадлежностью к местным ресурсам, полной автоматизацией, безопасностью и практически безлюдностью добычи геотермальной энергии, а также возможностью строительства маломощных установок и экономической конкурентоспособностью [1].

Альтернативная энергетика

На сегодняшний день 24 страны используют геотермальные ресурсы для получения электричества и более 70 стран — для тепловой энергии, что составляет только 3.5% мирового геотермального потенциала по электроэнергии и 0.2% — по выработке тепла [2].

В России разведано всего 66 гидрогеотермальных месторождений, запасы термальных вод и пара которых оцениваются в 307 и 40.7 тыс. м³/сут соответственно. Но лишь 50% этих запасов используется для производства 1.5 млн Гкал тепла, что эквивалентно сжиганию около 300 тыс. т условного топлива [3]. Развитие геотермальной энергетики в России главным образом связано с двумя регионами: Дальним Востоком и Северным Кавказом.

На Северном Кавказе наибольшее количество геотермаль-

ных месторождений открыто в Чеченской Республике, занимающей третье место среди регионов РФ по утвержденным эксплуатационным запасам термальных подземных вод (64.7 тыс. м³/сут). Крупнейшее месторождение — Ханкальское, разрабатывалось с 1974 г. Тогда его основным потребителем стало теплично-парниковое хозяйство. Однако в 1994 г., с началом военных действий на территории республики, эксплуатация термальных подземных вод прекратилась [4].

В 2013 г. Грозненский государственный нефтяной технический университет в составе консорциума «Геотермальные ресурсы» при поддержке Минобрнауки РФ приступил к реализации проекта по строительству пилотной геотермальной станции, которая использует воды Ханкальского месторождения [5]. С начала 2016 г. станция мощностью 9.5 Гкал/ч находится в эксплуатации и работает по дублетной системе — одна нагнетательная и одна продуктивная скважины со 100-процентной обратной закачкой воды и с тепличным комплексом в качестве потребителя (рис.1).

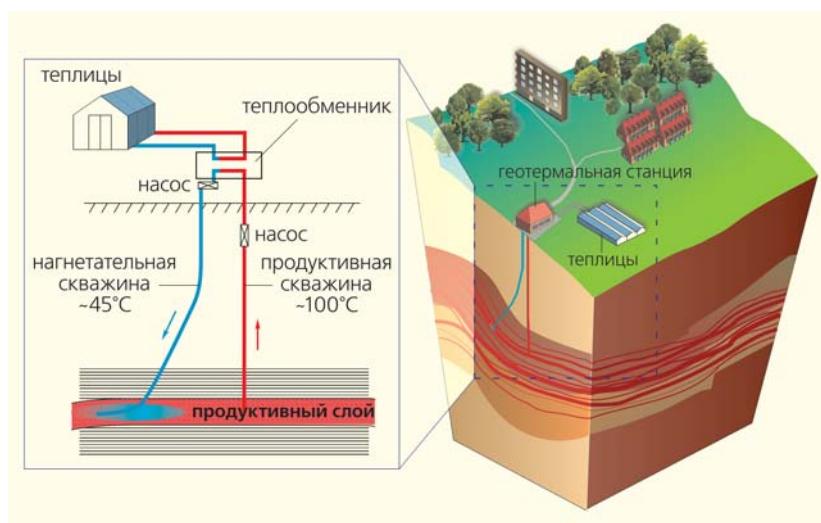


Рис.1. Схема «дублета» на Ханкальском месторождении термальных подземных вод.



Анвар Мансурович Фархутдинов, ассистент кафедры геологии и геоморфологии географического факультета Башкирского государственного университета. Область научных интересов — гидрогеология, термальные подземные воды, геоинформатика, тектоника.



Сергей Владимирович Черкасов, кандидат геолого-минералогических наук, директор Государственного геологического музея имени В.И.Вернадского РАН. Научные интересы связаны с прогнозом и поиском месторождений полезных ископаемых, применением беспилотных летательных аппаратов для решения геологических задач.



Магомед Шавалович Минцаев, доктор технических наук, профессор Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д.Миллионщикова. Область научных интересов — программное и аппаратное обеспечение автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии; новые технологии в возобновляемой энергетике.



Арби Ахамдиевич Шаипов, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии того же университета. Специалист в области геологии нефти и газа, геоэкологии и геотермальной энергетики.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, геотермальные ресурсы, термальные подземные воды, Ханкальское месторождение.

Key words: renewable energy, geothermal resources, geothermal waters, Khankala deposit.

Применение дублетных геотермальных циркуляционных систем при разработке месторождений позволяет создавать крупные (десятки тысяч кубических метров в сутки) термоводозаборы, использовать воды любого качества (потребительский и продуктивно-нагнетательный контур раз-

ведены), защищать недра от истощения, сокращать территорию распространения воронки депрессии и избегать слива использованных минерализованных вод на поверхность.

Ханкальская геотермальная станция — единственная в России с дублетной установкой, и опыт ее эксплуатации имеет значение для дальнейшего развития геотермальной энергетики не только в Чеченской Республике, но и в других регионах страны.

Геотермальный потенциал Чеченской Республики

Гидрогеологические условия территории Чеченской Республики определяются ее расположением в южной части Восточно-Предкавказского артезианского бассейна общей площадью (вместе с субмаринной частью) 250 тыс. км² (рис.2). Основные перспективы использования термальных вод республики связаны с среднемиоценовыми отложениями артезианского бассейна. Область питания находится на юге республики, в Черных горах, где породы выходят на поверхность. Зона частичной разгрузки и питания относится к выходам отложений в районе Передовых хребтов: Сунженского, Терского, Брагунского и Гудермесского. Скрытая разгрузка происходит в Каспийское море, после фильтрации воды движутся в северном и северо-восточном направлениях [6].

Общая приуроченность термальных подземных вод к территории Северного Кавказа объясняется в рамках шарьяжно-надвиговой теории, которая рассматривает данный регион в качестве мобильной тектонической зоны [7]. На содержание

термальных подземных вод в отложениях среднего миоцена кроме благоприятных фильтрационных параметров повлияли тепловой поток и структурно-тектонический фактор (воды нагреваются в синклинальных прогибах и затем поднимаются на поверхность). Кроме того, среднемиоценовые

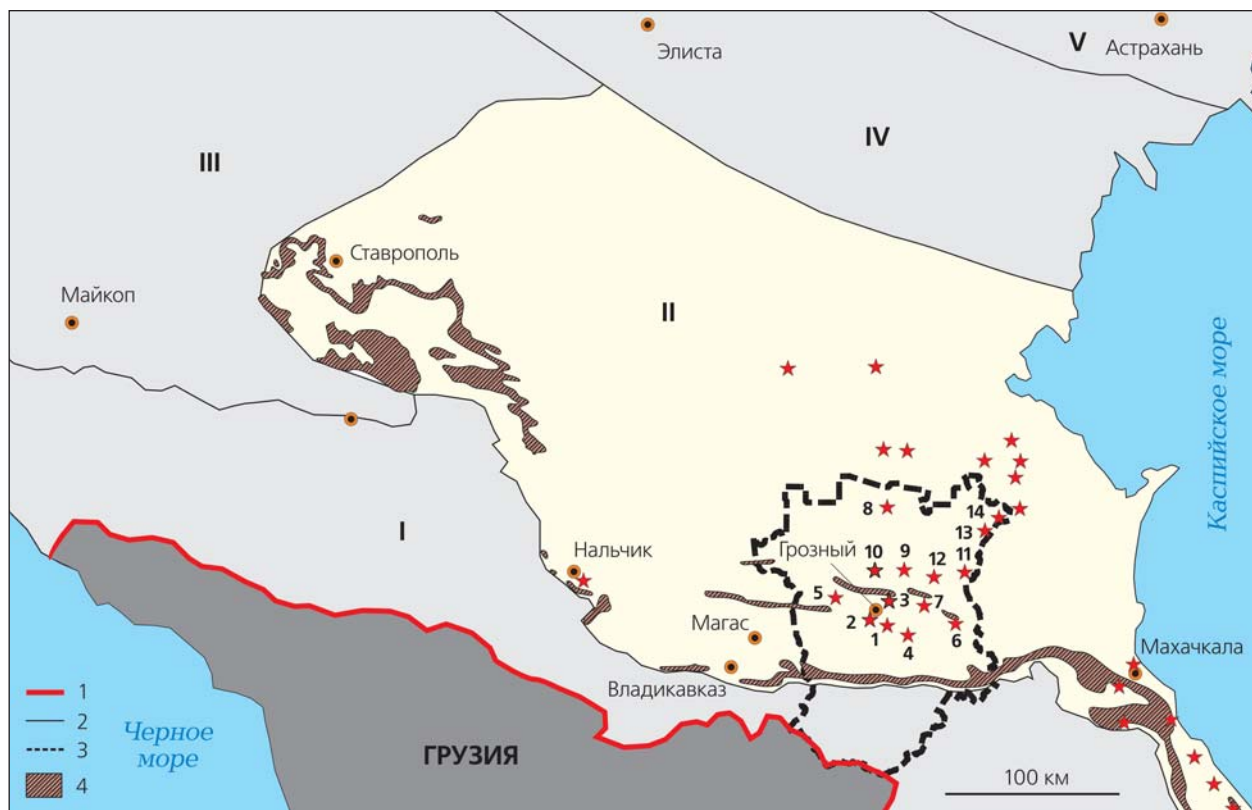


Рис.2. Схематическая карта Восточно-Предкавказского артезианского бассейна. 1 — государственная граница, 2 — границы гидрогеологических структур, 3 — граница Чеченской Республики, 4 — выходы караган-чокракских отложений на поверхность. I — Кавказская гидрогеологическая складчатая область, II–V — артезианские бассейны: II — Восточно-Предкавказский, III — Азово-Кубанский, IV — Ергенинский, V — Прикаспийский. Звездочками показаны месторождения термальных подземных вод Чеченской Республики: 1 — Ханкальское, 2 — Гойтинское, 3 — Петропавловское, 4 — Герменчукское, 5 — Гунюшки, 6 — Новогрозненское, 7 — Гудермесское, 8 — Центральное Бурунное, 9 — Червленое, 10 — Комсомольское, 11 — Щелковское, 12 — Новошедринское, 13 — Каргалинское, 14 — Дубовское.

караган-чокракские отложения заключены между мощными толщами сарматских и майкопских глин, способствующих сохранению тепла [3].

Всего в Чеченской Республике разведано 14 месторождений термальных подземных вод (см. рис.2). По оценке потенциала их тепловых ресурсов, суммарная возможная выработка тепла составляет 7.4 тыс. ГДж/сут, что равнозначно использованию 240 т каменного угля или 170 т нефти в сутки [8]. Расчет произведен по формуле, адаптированной для установки циркуляционных систем

теплоотбора (табл.1): $G = 10^{-3} Q \eta C (T_{\text{добыча}} - T_{\text{закачка}})$, где G — тепловые ресурсы (ГДж/сут), Q — дебит ($\text{м}^3/\text{сут}$), $T_{\text{добыча}}$ — температура извлекаемой воды из скважины, $T_{\text{закачка}}$ — температура (45°C) закачиваемой воды в пласт, C — удельная теплоемкость воды ($4.186 \text{ кДж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$), η — коэффициент полезного действия пластинчатого теплообменника, равный 0.9.

Ханкальское месторождение термальных подземных вод расположено в 10 км к юго-востоку от г.Грозного. Оно представляет собой резервуар многопластового типа с ярко выраженным водона-

Таблица 1

Оценка тепловых ресурсов месторождений термальных подземных вод Чеченской Республики

Месторождение	Средняя температура, $^\circ\text{C}$	$T_{\text{добыча}} - T_{\text{закачка}}, ^\circ\text{C}$	Эксплуатационные запасы, тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$	Выработка тепла, ГДж/сут	Суммарное количество тепла, ГДж/сут
Ханкальское	81.5	36.5	15.6	2145	7347
Червленое	76	31	5.2	607	
Каргалинское	96.5	51.5	5.0	970	
Новогрозненское	77	32	3.41	411	
Остальные	87.5	42.5	20	3213	

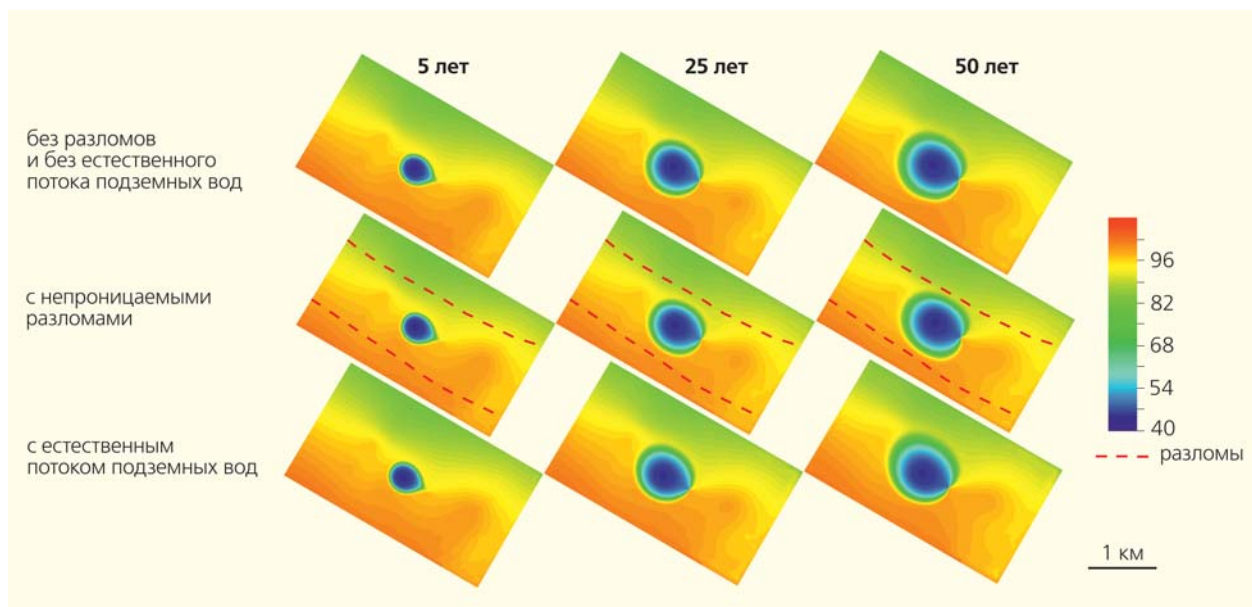


Рис.3. Изменение температур XIII продуктивного пласта Ханкальского месторождения термальных подземных вод при эксплуатации в течение 5, 25 и 50 лет. Расстояние между забоями скважин «дублета» 450 м.

порным режимом. С северо-востока и юго-востока границами месторождения служат два взброса, которые формируют дислокацию типа горст. Продуктивные пласты сложены песчаниками чокракского и караганского ярусов среднего миоцена, переслаивающимися с глинистыми прослоями [9]. В качестве ресурса геотермальной станции был выбран продуктивный пласт (XIII) караганского яруса со средней мощностью 47 м.

Математическое моделирование эксплуатации месторождения

Основная проблема при разработке месторождений термальных подземных вод с обратной закачкой — постепенное снижение (в результате нагнетания холодной воды) температуры резервуара. Для оценки долгосрочной устойчивой эксплуатации данных месторождений широко масштабно применяется математическое моделирование. При разработке Ханкальского месторождения осуществлено компьютерное моделирование с применением программного комплекса Metis, который используется для решения проблем эксплуатации в Парижском артезианском бассейне [10].

Из-за того что природа северного и южного разломов на территории Ханкальского мес-

торожения недостаточно ясна, моделирование производилось в трех вариантах: при непроницаемых тектонических нарушениях, с учетом естественного движения потока подземных вод и без их учета (рис.3).

Кривая температуры воды для продуктивной скважины показывает, что первое понижение температуры произойдет через пять-шесть лет постоянного режима эксплуатации: забор воды 2808 м³/сут (200 м³/ч 7 мес в год) и обратная закачка с тем же дебитом и температурой 45°C (рис.4). При моделировании также принималось во внимание расстояние между забоями продуктивной и нагнетательной скважин (табл.2). По расчетам рекомендуемая дистанция между забоями должна составлять более 750 м, что позво-

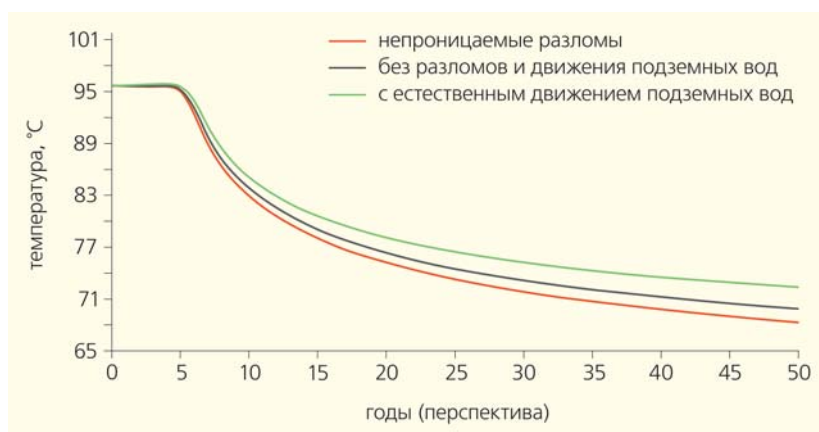


Рис.4. Изменение температуры в продуктивной скважине при эксплуатации. Расстояние между забоями скважин «дублета» 450 м.

Таблица 2

Моделирование изменения температуры термальных подземных вод в продуктивной скважине

моделирования	$\Delta T = 1^\circ\text{C}$, через год	$\Delta T = 1^\circ\text{C}$, через 50 лет
расстояние 450 м		
без естественного движения подземных вод, без учета влияния разломов	5.33	25.82
непроницаемые разломы	5.25	27.35
с учетом естественного движения подземных вод	5.75	23.33
расстояние 750 м		
без естественного движения подземных вод, без учета влияния разломов	16.5	14.61
непроницаемые разломы	15.17	17.04
с учетом естественного движения подземных вод	18.42	11.76
расстояние 1000 м		
без естественного движения подземных вод, без учета влияния разломов	31.33	6.43
непроницаемые разломы	27.5	9.11
с учетом естественного движения подземных вод	38.25	3.63

лит избежать значимого снижения температуры в скважине через 25–30 лет — обычного периода эксплуатации скважинного оборудования.

Нами проведено моделирование эксплуатации Ханкальского месторождения в течение 50 лет с последующей остановкой разработки (рис.5). Согласно результатам с учетом естественного потока подземных вод, полное восстановление температуры в добывающей скважине произойдет через 113.5 года после остановки эксплуатации, а без учета этого фактора температура восстановится на 56.4% через 150 лет после завершения разработки.

Таким образом, завершение эксплуатации Ханкальского месторождения термальных подземных вод сопровождается сравнительно быстрым восстановлением его температурного режима. Кроме того, геотермическая особенность территории обусловлена наличием серии непроницаемых про-

парниковый газ, который выделяется работающей геотермальной станцией, — CO_2 . Его объем значительно колеблется (в среднем $122 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч CO}_2$). Для сравнения: газовая электростанция за мегаватт-час выделяет углекислого газа почти в 14 раз больше. Кроме того, работа газовой электростанции сопровождается выбросами оксида серы (количество которого в 22 раза выше), оксида азота и твердых частиц, отсутствующих при эксплуатации геотермальной станции [13]. В геотермальных станциях с замкнутым контуром, к которым относится и Ханкальская (рис.6), количество выбросов CO_2 близко к нулю [14].

Применение термальных вод на Ханкальской станции позволит избежать выбросов примерно 7 тыс. т CO_2 за отопительный период (7 мес), что равнозначно количеству углекислого газа, выделяемого газовой котельной аналогичной мощности.

С помощью современных технологий можно преодолеть ряд негативных воздействий, сопровождающих разработку Ханкальского месторождения подземных термальных вод.

Шум оборудования во время бурения и строительства.

После ввода в эксплуатацию, в соответствии со стандартами уровня шумового загрязнения, работа геотермальной электростанции, как правило, производит меньше шума, чем шелест листьев от ветра [16].

Нарушение поверхностного слоя земли, которое возникает при любой строительной деятельности. В случае установки циркуляционной схемы теп-

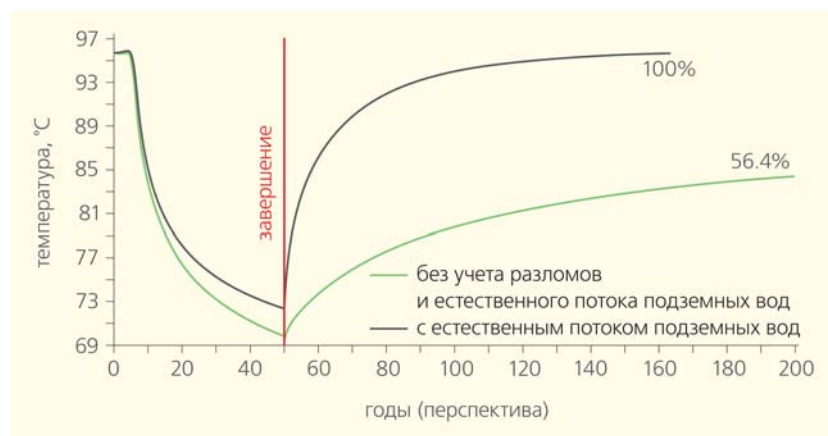


Рис.5. Изменение температуры в продуктивной скважине в течение 50-летней эксплуатации и после завершения разработки. Расстояние между забоями скважин «дублета» 450 м.



Рис.6. Схематический рисунок Ханкальской геотермальной циркуляционной системы отбора глубинного тепла Земли [15].

лоотбора продуктивная и нагнетательная скважины бурятся с одной площадки. Расстояние между их устьями составляет не более 10 м. В результате территория, отчуждаемая под водозабор и зону санитарной охраны, уменьшается в несколько раз. В условиях российских реалий компактное расположение двух скважин и геотермальной станции — важное преимущество, облегчающее их контроль и охрану. Площадь территории, отведенной для Ханкальской геотермальной станции, составляет 4900 м², при этом площадь самой станции, включая скважины, — 406 м².

Физическое воздействие. Эксплуатация подземных термальных вод сопряжена с такими природными факторами, как микроземлетрясения, извержения гидротермального пара и просадка грунта. Оценка геологических рисков и использование направленной обратной закачки для поддержания давления на важнейших глубинах позволяют избежать таких последствий либо свести их к минимуму [17].

Тепловое и химическое загрязнение. Большинство вредоносных химических веществ термальных вод находится в жидком состоянии, что при их сливе наносит вред экосистемам. Использование технологии дублетов со 100-процентной обратной закачкой отработанных вод позволяет решить эту проблему.

При разработке месторождений термальных подземных вод с применением технологии дублетов основную экологическую опасность представляют собой **утечки флюида из первичного контура**. Для решения этой проблемы мы провели экспериментальный мониторинг эксплуатируемого месторождения с беспилотного летательного аппарата (Geoscan 201 Pro), который осуществил мультиспектральную съемку с использованием тепловизора «Термофрейм-М-640». Маршрут рассчитывался автоматически, исходя из параметров

матрицы и оптики тепловизора. Расстояния выбирались с учетом 70% перекрытия соседних кадров. Проведенная теплосъемка пос.Гикало и прилегающей к нему территории Ханкальского месторождения (рис.7) выявила 13 аномалий с различными источниками (кострами, системой отопления и др.).

Результаты эксперимента показали возможность контроля эксплуатируемых месторождений термальных подземных вод с помощью беспилотного летательного аппарата и тепловизора для выявления аномалий, вызванных утечками старых скважин и трубопроводов, сливом использованного флюида и др. Кроме того, подобный мониторинг позволит производить своевременные ремонтные и очистные работы в случае обнаружения дефектов системы, тем самым увеличивая срок ее эксплуатации. Ликвидация утечек повышает и экологическую безопасность использования термальных подземных вод.

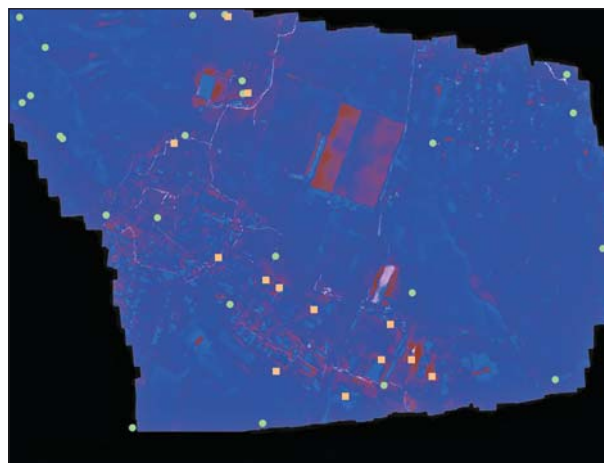


Рис.7. Теплосъемка пос.Гикало. Кругами показаны скважины, квадратами — аномалии теплосъемки.

Еще одна проблема эксплуатации термальных подземных вод с использованием дублетной системы — **коррозия и осаждение минеральных и бактериальных образований в скважинах**, приводящие к прогрессивному снижению дебитов. Как показал химический анализ вод Ханкальского месторождения, минерализация XIII пласта составляет 0.8–1.7 г/л и относится к гидрокарбонатно-натриевому типу. Для уменьшения образования твердых отложений в виде карбонатов на месторождении используются ингибиторы коррозии (5 г на тонну обрабатываемой воды). Коррозия может частично происходить из-за наличия бактерий. Процесс формирования бактериальных колоний имеет тенденцию к самоускорению, и очень важно задержать его начало как можно дольше. Один из лучших методов — эксплуатация месторождений при максимально возможных дебитах. В таких случаях бактериальным колониям труднее адсорбироваться на поверхности [18].

Использование дублетов наряду с надлежащим экологическим мониторингом и превентивными мероприятиями позволяет минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, и сейчас это один из наиболее оптимальных способов разработки термальных подземных вод.

Экономические аспекты геотермальной энергетики

В условиях возрастающих энергетических потребностей Чеченской Республики, где ископаемого органического топлива для полного самообеспечения недостаточно, термальные подземные воды приобретают особую актуальность. Геотермальные ресурсы служат частичной альтернативой поставкам топлива из других регионов, требующим значительных дополнительных затрат на транспортировку [19].

Одна из основных статей расходов при создании циркуляционных геотермальных систем в тиражируемом варианте — бурение скважин, составляющее примерно 80% стоимости всего проекта. Значительные инвестиции требуются и на капитальное строительство. Вместе с тем после реализации проекта есть возможность поставки инженеринговых услуг в части монтажа геотермальной циркуляционной системы. Конкурентоспособ-

ность такой системы обусловлена небольшой себестоимостью получаемого тепла за счет низких операционных затрат [1], которые более предсказуемы, в отличие от затрат при использовании традиционных видов топлива, подверженных рыночным колебаниям цен на энергоресурсы.

Ханкальская геотермальная станция не имеет аналогов в России, и поэтому величина инвестиций на ее строительство возросла на стоимость научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) [19]. Форма участия государства в финансовом обеспечении проекта — субсидирование со стороны Министерства образования и науки РФ.

Для оценки коммерческой эффективности при использовании термальных вод на основе геотермальной циркуляционной системы рассчитаны стандартные показатели инвестиционной привлекательности проекта: срок окупаемости и ее дисконтированный срок, чистый дисконтированный доход, внутренняя норма рентабельности. К затратам на производство теплотенергии относятся основные и вспомогательные материалы (включая ингибиторы солей), электроэнергия, оплата труда, плата за добычу подземных вод, текущий и капитальный ремонт и др. Расчеты производились непосредственно для Ханкальского проекта, с учетом НИОКР и доходов от последующего тиражирования результатов, и для строительства станции аналогичной мощности, без НИОКР и тиражирования (табл.3).

В целом показатели обнаруживают инвестиционную привлекательность проекта, за исключением реализации тепла. Для окупаемости проектов по использованию термальных вод необходима государственная поддержка, в том числе в рамках тарифного регулирования. Это будет способствовать развитию геотермии как одного из возобновляемых, экологически чистых источников энергии, росту занятости и созданию рабочих мест для достаточно широкого перечня специалистов. Необходимость подготовки кадров — серьезный стимул и для образования научно-исследовательского центра по вопросам использования геотермальной энергии. Положительный результат эксплуатации экспериментальной геотермальной циркуляционной системы дает возможность перейти к серийному строительству подобных станций. Использование значительного потенциала геотермальных вод республики для различных целей

Таблица 3

Экономические показатели (15-летний срок эксплуатации)

Капитальные расходы, млн руб.	Срок окупаемости, лет	Дисконтированный срок окупаемости, лет	Чистый дисконтированный доход, млн руб.	Внутренняя норма доходности, %
проект Ханкальской геотермальной станции				
430	4.6	13.6	324.7	18.1
геотермальная станция				
130	6.3	>15	200	8.7

теплоснабжения повысит энергообеспеченность региона без ущерба для окружающей среды, а также снизит потребность в традиционном топливе.

* * *

Использование термальных подземных вод Чеченской Республики — перспективное направление по стабилизации экономики региона. Применение современных геотермальных циркуляционных систем при разработке месторождений дает возможность создавать крупные термоводозаборы, использовать воды любого качества, защищать недра от истощения. Компьютерное моделирование эксплуатации геотермального месторождения

позволяет определять оптимальный режим его разработки. Технология «дублета» с полной обратной закачкой получаемых вод и современные методы мониторинга функционирования геотермальной системы — эффективное решение экологических проблем, связанных с эксплуатацией месторождений. Широкая реализация инновационного экологически безопасного и экономически конкурентоспособного проекта Ханкальской геотермальной циркуляционной системы будет способствовать изменению структуры энергопотребления в регионах, которые обладают запасами термальных подземных вод, а также существенному улучшению экологической обстановки. ■

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор №02.G25.31.0056 и соглашение №14.607.21.0081 от 16.10.2014).

Литература

1. Богуславский Э.И. Использование геотермальной энергии для целей теплоснабжения // ЭСКО. Электронный журнал энергосервисной компании. Экологические системы. 2010. №3 (99).
2. Алхасов А.Б. Современное состояние и перспективы развития геотермальной энергетики // Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. Махачкала, 2006. С.4–11.
3. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. М., 2012.
4. Фархутдинов А.М., Исмаилов Р.А., Фархутдинов И.М. и др. Перспективы использования теплоэнергетических вод Чеченской Республики на базе опыта аналогичных работ во Франции (Парижский бассейн) // Вестник Томского государственного университета. 2015. №398. С.257–264.
5. Черкасов С.В., Чурикова Т.Г., Бекмурзаева Л.Р. и др. Состояние и перспективы использования геотермальных ресурсов в Российской Федерации // Материалы международной научно-практической конференции «Geoenergy». Грозный, 19–21 июня 2015 г. Грозный, 2015. С.303–322.
6. Киссин И.Г. Восточно-Предкавказский артезианский бассейн. М., 1964.
7. Исмаилов Р.А., Фархутдинов И.М., Фархутдинов А.М., Фархутдинова Л.М. Шарьяжно-надвиговой теории — 50 лет // Природа. 2015. №12. С.50–59.
8. Ресурсы термальных вод СССР / Под ред. С.С.Бондаренко. М., 1975.
9. Шнак А.А. Отчет по подсчету эксплуатационных запасов термальных вод месторождения Ханкальская долина ЧИАССР (для теплоснабжения и горячего водоснабжения) по состоянию на 1/1–68 г. Саратов, 1968.
10. Goblet P. Modélisation des transferts de masse et d'énergie en aquifère [Modelling mass and energy transfers in aquifers]: PhD Thesis. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Paris, 1980.
11. Farkhutdinov A., Goblet P., Fouquet C. de, Cherkasov S. A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters // Geothermics. 2016. V.59. P.56–66.
12. Фархутдинов А.М., Фуке Ш. де, Минцаев М.Ш., Черкасов С.В. Применение геостатистики для анализа перспектив эксплуатации Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод // Геоинформатика. 2015. №1. С.60–68.
13. Matek B. Geothermal power: international market overview // Geothermal Energy Association. 2013. P.10–11.
14. Kaltschmitt M. Environmental. Effects of heat provision from geothermal energy in comparison to other resources of energy // Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan, 28 May – 10 June 2000. P.627–632.
15. Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А. и др. Термальные воды Чеченской Республики и перспективы их использования // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты окружающей среды и техносферной безопасности в меняющихся антропогенных условиях. Белые ночи — 2014», Грозный, 1–3 июня 2014 г. Грозный, 2014. С.253–259.
16. Kagel A., Bates D., Gawell K. A Guide to Geothermal Energy and the Environment. Washington, 2007.
17. Goldstein B., Hiriart G., Bertani R. et al. 2011: Geothermal energy // IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge; N.Y., 2011. P.401–436.
18. Giuglaris E., Malcuit E., Wacogne F. Khankala Project. Study of a geothermal loop in Grozny (Chechen Republic, Russia) // Technical Audit of Report n°1. Report BRGM/RC-63510-FR. Orleans, 2014.
19. Малышев Ю.Н., Таймасханов Х.Э., Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш. Перспективы развития геотермальной энергетики в Чеченской республике // Геоэкологические, медико-биологические и рекреационные вопросы устойчивого развития горных территорий. 2014. №1(19). С.63–67.

Взаимодействие растений с насекомыми: палеозойская история

*Над лесом сигиллярий, над лесом фавулярий
Летела голденбергия вперед.
А где-то там на ветке, а где-то там на вайе
Висел вполне созревший птеридосперма плод.
Подлетает она, подлетает, тихо крыльями шурша.
И съедает его, и съедает, сок вкушая не спеша.*

С.В.Наугольных

Наземные растения, начиная с глубочайшего геологического прошлого, вовлечены в сложные взаимоотношения с самыми разными компонентами экосистем, в первую очередь с почвой, с соседями по растительному сообществу — фитоценозу, с грунтовыми водами и с атмосферными осадками. И практически с самого момента своего появления высшие растения находились в тесной взаимосвязи с различными членистоногими, прежде всего насекомыми.

Взаимодействие это было многовалентным (то негативным, то позитивным), и в конце концов оно привело к образованию симбиотической пары «опыляемый-опылитель», без появления которой, пожалуй, не было бы того чарующего разнообразия покрытосеменных растений, которое окружает нас сегодня.

Давайте попробуем взглянуть на ранние этапы коэволюции растений и насекомых, для того чтобы попытаться ответить на один из традиционных вопросов в теории эволюции: чего в природе больше — ожесточенной борьбы за существование или, напротив, симбиотического сотрудничества?

Питание

Вне зависимости от того, кто мы — убежденные вегетарианцы или, наоборот, любители разных гастрономических изысков, на нашем столе всегда находится большое количество продуктов растительного происхождения. Именно растения дают нам углеводы, обеспечивающие энергетику



Сергей Владимирович Наугольных, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Геологического института РАН, профессор РАН; контрактная аффилиация — ведущий научный сотрудник научной лаборатории стратиграфии Казанского федерального университета. Область научных интересов — палеоэкология, систематика и эволюция высших растений, изучение палеопочв.

Ключевые слова: палеоботаника, коэволюция, пермская система, Приуралье.
Key words: palaeobotany, co-evolution, Permian system, Cis-Urals region.

организма, и многие из белков, позволяющих строить и обновлять мышечную массу. Нужны и растительные жиры (вспомним хотя бы подсолнечное масло), способствующие образованию запасов питательных веществ «на черный день».

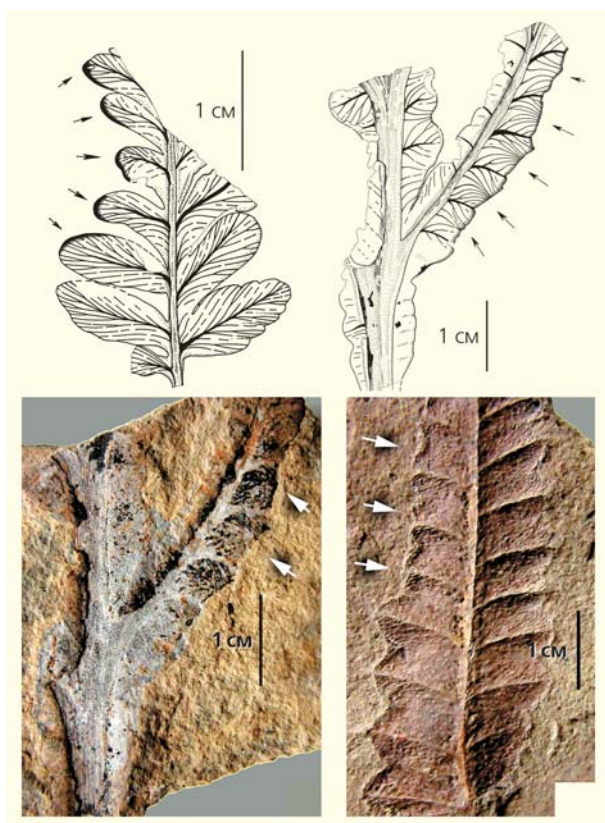
Именно с трофической точки зрения растения рассматривались насекомыми с первых же дней их совместной эволюции в наземных экосистемах. Известны многочисленные и разнообразные краевые погрызы листовых пластинок, оставленные насекомыми и многоножками-диплоподами на листьях палеозойских птеридоспермов. В середине пермского периода насекомые (а именно жуки пермокупедиды) научились переваривать и усваивать целлюлозу древесины древних голосеменных — кониферофитов [1].

Однако у растений нашлись и более лакомые для насекомых части — спорангии, а позднее и семязачатки, насыщенные углеводами и белками.

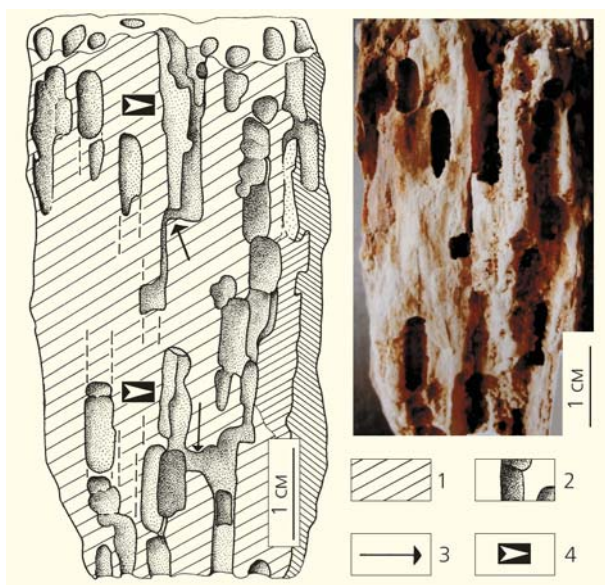
В каменноугольных и пермских отложениях Ангарида (древнего материка, располагавшегося на месте северо-восточной части современной Евразии) встречаются семена с маленькими круг-



Goldenbergia sp., пролетающая над лесом раннепермской эпохи в Ангариде (морфология голденбергии дана по [11], с изм.).
Здесь и далее рисунки автора



Листья пельтаспермового птеридосперма *Pernocallipteris retensoria* с краевыми погрызами (отмечены стрелками) из отложений кунгурского яруса нижней перми Приуралья (местонахождение Чекарда-1).



Древесина кониферофита *Dadoxylon* sp. с ходами жуков из семейства пермокупедид из отложений казанского яруса средней перми Прикамья (местонахождение Тихие Горы): 1 — продольное сечение фрагмента древесины; 2 — полость в древесине, 3 — тоннели, 4 — шахты.

лыми отверстиями — следами проникновения длинных челюстей-стилетов внутрь семязачатка, через которые насекомое высасывало его вкусное содержимое — так же, как гурман пьет через трубочку коктейль. Пример таких насекомых — голденбергия (*Goldenbergia*), описанная из нижнепермских отложений Сибири. Голосеменных растений в то время в этом регионе уже было множество, и они еще не научились защищаться от ловких любителей отведать палеозойского аналога кокосового молока.

В пермских отложениях Приуралья время от времени попадают семена, описанные как *Cardiocarpus cordatus*. На некоторых из них можно обнаружить аккуратные дырочки, расположенные почему-то всегда у самого основания семени. Не было понятно, каким именно растениям принадлежали эти семена. Кто сделал дырочки, тоже оставалось неизвестным. Выдающийся российский палеонтолог А.Г.Шаров высказал предположение, что подобные перфорации были оставлены на семенах из верхнепалеозойских отложений Сибири палеодиктиоптерами [2]. Представители палеодиктиоптер — насекомые рода парадунбария (*Paradunbaria*) — встречаются в нижнепермских отложениях Приуралья, где были найдены семена кардиокарпуса кордатуса с перфорациями. Судя по всему, именно парадунбария и высасывала содержание семязачатков *C.cordatus*. Но почему дырочки от проколов располагаются в основании семян? Ответ подсказали исследования Поташки — интереснейшего местонахождения ископаемых животных и растений, расположенного в Артинском р-не Свердловской обл.

Строго говоря, Поташка — это не одно местонахождение, а целый комплекс из четырех местонахождений, получивших названия Поташка-1, -2, -3 и -4, а также находящийся по соседству местонахождения Сухановка-1 и -2. В них обнажаются зеленоватые полимиктовые песчаники артинского яруса нижнего отдела пермской системы. Эти же песчаники выходят на дневную поверхность и к северу — у г.Арти на горе Кашкабаш, где находится исторический стратотип артинского яруса. Их, собственно, и изучал академик А.П.Карпинский, установивший артинский ярус, который с той поры частенько называют ярусом Карпинского. Сами песчаники характерного буровато-зеленого оттенка нередко называют жерновыми, поскольку из них выпиливали большие круглые жернова для сельских мельниц.

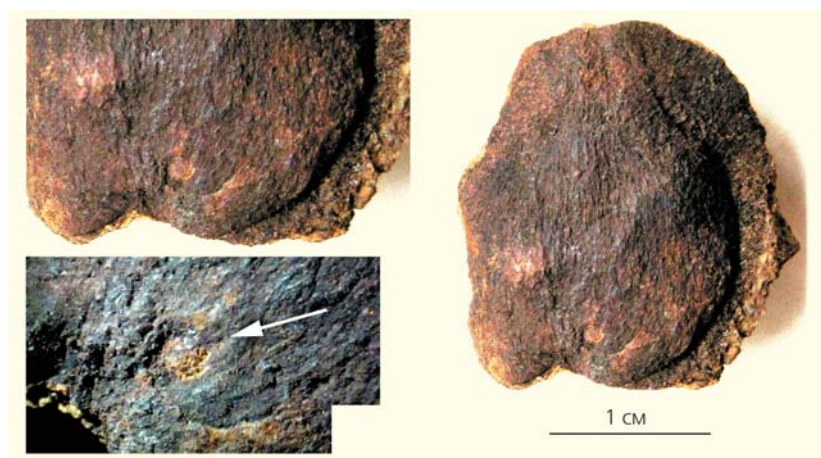
В целом жерновые песчаники довольно бедны органическими остатками. В них время от времени попадаются раковины головоногих моллюсков аммоноидей, которым Карпинский посвятил одну из своих блестящих палеонтологических работ. Помимо аммоноидей в отдельных прослоях и в особенности в конкрециях можно найти растительные остатки хорошей сохранности. Из растений здесь встречаются древние хвощевидные

рода *Paracalamites*, отдельные перья папоротников, листья пельтаспермовых птеридоспермов, гинкгофитов и войновскиевых, побеги хвойных и разнообразные семена. Однако в количественном отношении во всех четырех Поташках совершенно отчетливо доминируют семена *C.cordatus* и декортицированные побеги вальхиевых хвойных. Облиственные побеги, непосредственно относящиеся к роду *Walchia*, тоже время от времени встречаются в этих местонахождениях, но реже.

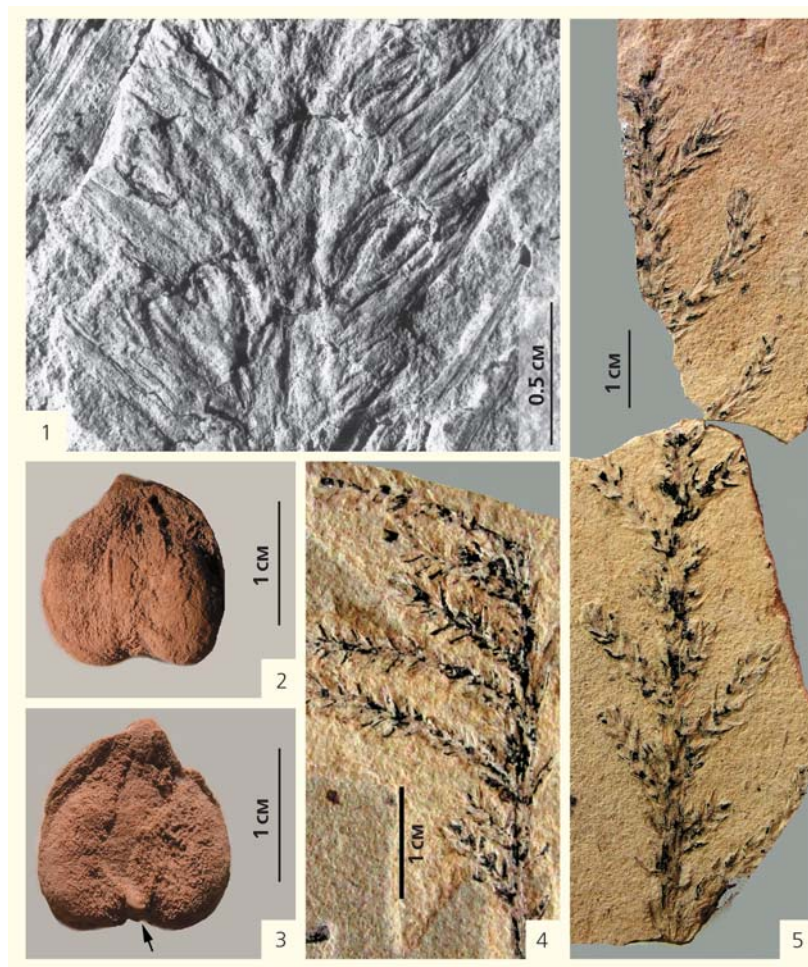
Для меня после изучения Поташки стало совершенно очевидно, что *C.cordatus* — это семя на вальхиевых хвойных. Но эта группа растений в отложениях нижней перми Приуралья представлена несколькими видами. К какому именно из них принадлежали эти семена, еще предстояло установить.

Проблема в том, что семена голосеменных в целом и хвойных в частности довольно редко сохраняются прикрепленными к семеносным органам, поэтому задачу предстояло решить формально-логическим путем. Исключив из рассмотрения всех кандидатов, заведомо не подходивших на роль растений, которые продуцировали семена *C.cordatus*, я остановил свой выбор на двух видах — *Walchia appressa* и *W.bardaeana*. Оба этих вида вальхиевых хвойных были описаны знаменитым российским палеоботаником М.Д.Залесским еще в 1937 г. [3]. Ему было неизвестно, как были устроены семеносные органы этих хвойных, но, поскольку их облиственные побеги различались довольно отчетливо, никаких сомнений в том, что это два разных самостоятельных вида, ни тогда, ни сейчас не возникало и не возникает.

Женские стробилы вида *W.appressa* значительно позднее были найдены и описаны С.В.Мейеном, другим ярким российским палеоботаником и эволюционистом. Найденные стробилы уче-



Семя *Cardiocarpus cordatus* с проколом в основании (показан стрелкой) из отложений артинского яруса нижней перми Приуралья (местонахождение Сухановка-1).



Ископаемые остатки вальхиевого хвойного *Walchia bardaeana* из отложений артинского (2, 3) и кунгурского (1, 4, 5) ярусов нижней перми Приуралья: 1 — средняя часть женской фертильной зоны (местонахождение Красная Глинка), 2, 3 — семя *Cardiocarpus cordatus*, стрелкой отмечен семенной рубчик — место, посредством которого семязачаток прикреплялся к семяножке (местонахождение Актюбинск); 4, 5 — облиственные побеги *W.bardaeana* (местонахождение Таежное-1).

ный описал под собственными родовым и видовым названиями *Kungurodendron sbarovii* [4]. Но после обнаружения стробиллов этого типа в прикреплении к облиственным ветвям *W. appressa*, которые были обнаружены в еще одном знаменитом местонахождении ископаемых животных и растений пермского возраста — Чекарде [5], стало совершенно очевидно, что это один и тот же вид исходного растения.

Семенная чешуя *W. appressa* имеет отчетливо радиально-симметричное строение. Семенная чешуя несет не менее восьми-девяти мелких изогнутых семяножек. Семена *C. cordatus* на них размещаться не могли — просто не хватило бы места в пазухе брактее (стерильного придатка чешуевидной формы, прикрывающего семенную чешую) стробила. Таким образом, *W. appressa* из дальнейшего рассмотрения была исключена.

Надежно установить, какими были женские стробилы другого вида вальхиевых хвойных — *W. bardaeana*, долгое время не удавалось, пока во время полевых работ моим коллегам из Кунгурского историко-архитектурного и художествен-

ного музея-заповедника не улыбнулась удача. В местонахождении, расположенном в Пермском крае, недалеко от с. Матвеева, на правом берегу р. Барды, им удалось найти побег *W. bardaeana* с женским репродуктивным органом хорошей сохранности. К моему удивлению, этот орган оказался совсем не стробилом, а фертильной зоной, т.е. участком побега с располагающимися на нем брактеей и семенными чешуями. Выше этого фертильного участка находился обычный побег с нормальными листьями. Он к тому же ветвился.

Внимательно рассмотрев находку, я внезапно осознал, что похожая фертильная зона уже есть в моей коллекции. Стерильные листья на ней не сохранились, из-за чего нельзя было установить, что этот орган принадлежал *W. bardaeana*. Я даже собирался описать имевшийся у меня экземпляр как новый вид.

После детального изучения фертильных зон этого вида удалось установить, что в их брактеечно-пазушных комплексах имела единственная уплощенная семяножка, окруженная многочисленными игловидными или чешуевидными стерильными придатками. В верхней части семяножки на ее стороне, обращенной к оси фертильной зоны, находился семенной рубец, к которому при жизни растения прикреплялось единственное семя. Расширяющаяся сверху семяножка своей формой напоминала очертания семян *C. cordatus*. Семя, очевидно, должно было прикрепляться к семяножке только одной стороной. Иными словами, семенной рубчик на семенах *C. cordatus* должен был быть смещен на одну из сторон семени. Внимательно рассматривая наиболее хорошо сохранившиеся семена этого вида, имеющиеся в моей коллекции, я обнаружил, что так оно и есть! Раньше я этого не замечал.

Стало понятно, что семена *C. cordatus* сидели на семяножках обращенно, инвертированно — своей микропилярной частью (т.е. верхушкой семени) вниз к оси фертильной зоны. Наружу выглядывало только основание семени. Именно его и протыкали своим хоботком-стилетом парадунбарии. Вот почему дырочки от их проколов располагаются в основании семян! На основе всех этих наблюдений и умозаключений я подготовил графическую реконструкцию фертильной зоны *W. bardaeana* с сидящей на ней парадунбарией.

Микроперфорации, сходные с дырочками на семенах *C. cordatus*, но более мелкие, были обнаружены на стенках спорангиев мужских фруктификаций рода пермотека (*Permotheca*). Органы размножения этого типа были характерны для пельтаспермовых (о них подробнее будет рассказано ниже) и ранних гинкгофитов. Наличие таких перфораций на стенках спорангиев пермотек указывает на то, что и они вызывали трофический интерес у насекомых (скорее всего, все тех же палеодиктиоптер).



Парадунбария на фертильной зоне *Walchia bardaeana*. Ранняя пермь. Приуралье.

Защита

Раз есть угроза для семян, иными словами — для потомства, значит, надо искать выход из складывающейся драматической ситуации. Как говорится, «эволюционируй или вымирай». Развитие мощных покровных чешуй у хвойных (вспомним женские шишки современных елей и сосен) было вполне адекватным и эффективным ответом на эту угрозу.

Другая группа палеозойских голосеменных растений — птеридоспермы — пошла по иному пути. Их семена изначально сидели на листовидных органах, модифицированных в различной степени. Семена, таким образом, были открыты для всех желающих подзакусить из мира насекомых (например, для всё той же голденбергии). Подлетай, питайся!

Но уже вскоре птеридоспермы «научились» защищаться. Края фертильных листьев (мегаспорофиллов) с сидящими на них семенами стали подворачиваться, прикрывая семязачатки, причем этот процесс, по всей видимости, происходил независимо в разных группах птеридоспермов.

Из растений, произраставших в пермском периоде в Ангариде, и в особенности на тех территориях, которые спустя 270 млн лет стали Приуральем, в этом отношении весьма примечательны пельтаспермовые птеридоспермы порядка *Peltaspermales*. Таксономические границы этого порядка трактуются разными исследователями существенно по-разному. По моему мнению, объем этого порядка следует ограничить только тремя семействами: *Peltaspermales*, *Angaropeltaceae* и *Vetlugospermaceae* [6].

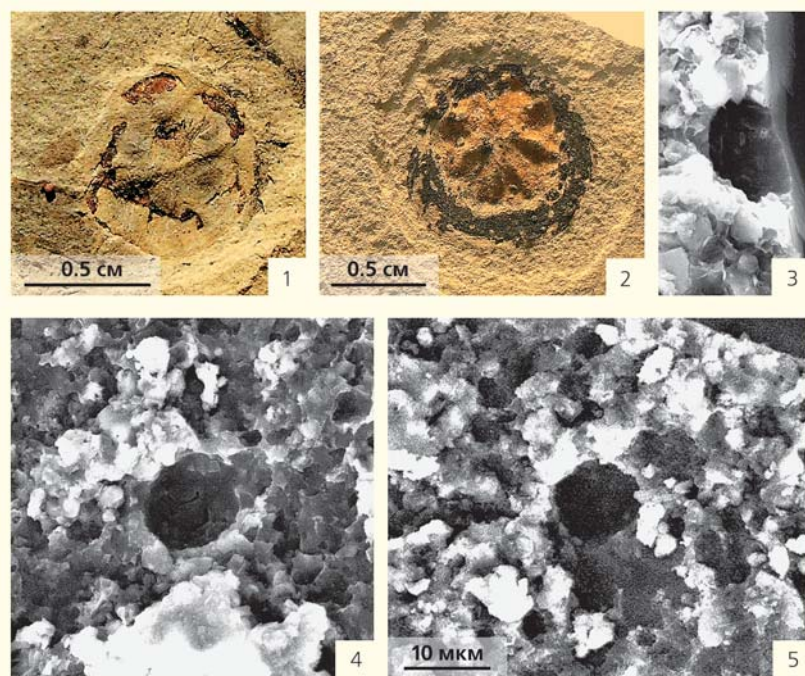
Женские репродуктивные органы растений, относящихся к семейству *Peltaspermales*, выглядели как кистевидные собрания семенных дисков. Каждый семенной диск (их еще называют пельтоидами) состоял из округлого уплощенного мегаспорофилла, к центру которого с нижней (адаксиальной) стороны прикреплялась ножка. Диск обычно был разделен на радиальные сектора, количество которых равнялось числу семян. Края диска могли быть ровными, фестончатыми или лопастными. Концентрически вокруг ножки к адаксиальной (т.е. обращенной к оси, к побегу) поверхности диска прикреплялись семена. Мегаспорофиллы (пельтоиды) посредством ножки соединялись с осью предыдущего порядка так, что все собрание мегаспорофиллов, по существу, становилось

стробилом, шишкой. До созревания семян края соседних щитков (дисков) могли смыкаться, а после созревания края расходились, семена отпадали от мегаспорофиллов и падали вниз под действием силы тяжести, поскольку были лишены крылатки.

Однако у представителей эволюционно более продвинутого семейства ангаропельтовых (*Angaropeltaceae*) возникло важное адаптивное новшество. Края мегаспорангиатных дисков этих растений загнулись вниз к ножке пельтоида до такой степени, что при этом образовалась практически полностью закрытая капсула с семенами внутри [7]. Между краем диска и ножкой пельтоида осталась лишь узкая щель. В нее высывались микропилярные части семян, а вот зачем — поговорим отдельно.

То, что этот процесс преобразования семеносного диска в капсулу был вызван необходимостью защитить семена от неблагоприятного воздействия негативных факторов среды, — в общем-то, очевидно. Но до какой степени это могло быть важно для растения, удалось понять только после изучения одного из родов ангаропельтовых — *Sylvocarpus* (*Sylvocarpus*).

Семеносные капсулы этого растения были устроены относительно просто. Ножка, как и у всех остальных настоящих пельтаспермовых (порядок *Peltaspermales*), прикреплялась к центральной части адаксиальной поверхности капсулы. Края капсулы изгибались книзу, практически примыкая к ножке. Очень похоже на то, что до созревания семян даже небольшая щель между ножкой капсулы



Семеносные капсулы *Sylvocarpus armatus* из отложений кунгурского яруса нижней перми Приуралья (1, 3–5 — местонахождение Чекарда-1, 2 — Таежное-1): 1, 2 — макроморфология; 3–5 — перфорации в кутикуле.

лы и краем мегаспорофилла тоже была прикрыта защитной пленкой. В пространстве под щитком капсулы находилось шесть семян. Первоначально предполагалось, что у голотипа их было только пять, однако дополнительное препарирование образца и находки новых экземпляров позволили установить, что и у типового экземпляра, и практически у всех других представителей этого вида было по шесть семян в капсуле.

Верхняя поверхность капсулы была покрыта необычно толстой кутикулой. Я изучил ее под электронным сканирующим микроскопом и был вознагражден за усердие. Оказалось, что на кутикуле сохранились явные следы округлых перфораций, оставленные каким-то насекомым, которое пыталось добраться до семян, заключенных внутри капсулы. Однако сделать это насекомому не удалось. Кутикула, покрывавшая капсулу, была настолько прочной и толстой, что ни один из проколов не оказался сквозным. Насекомому просто не удавалось преодолеть надежную защиту.

Я назвал этот новый вид сылкокарпус арматус (*Sylvocarpus armatus*), т.е. «сылвенский плод защищенный». Думаю, это один из самых первых примеров в эволюционной истории растений, когда в бесконечной «гонке вооружений» растениям удалось выработать надежный механизм защиты от непосредственного нападения.

Опыление

Настало время вспомнить об узкой щели между краем и ножкой семенной капсулы ангаропельтовых. Зачем же она была нужна?

Для оплодотворения семязачатка у голосеменных необходимо, чтобы на верхушку семени, где располагается микропилярный канал, попала пыльца, которая затем самостоятельно или прилипнув к капле вязкой жидкости, выделяемой семязачатком, проникает в пыльцевую камеру. Далее следует собственно процесс оплодотворения семязачатка и развития эмбриона нового растения.

Пока семязачатки просто висят на листе, как у относительно примитивных каменноугольных птеридоспермов, никаких особых проблем с их оплодотворением нет. Ветер носит по воздуху массу пыльцы, которая без особых сложностей попадает в микропиле семязачатков. Но вот если семязачатки заключены внутрь капсулы, пыльце проникнуть в микропиле не так-то просто.

На поверхности семенных органов у представителей всех трех семейств пельтаспермовых (и Peltaspermaceae, и Angaropeltaceae, и Vetlugospermaceae) имелись миниатюрные секреторные органы — железы, которые, возможно, выделяли феромоны, привлекавшие насекомых-опылителей. Считать это твердо доказанным пока нельзя,

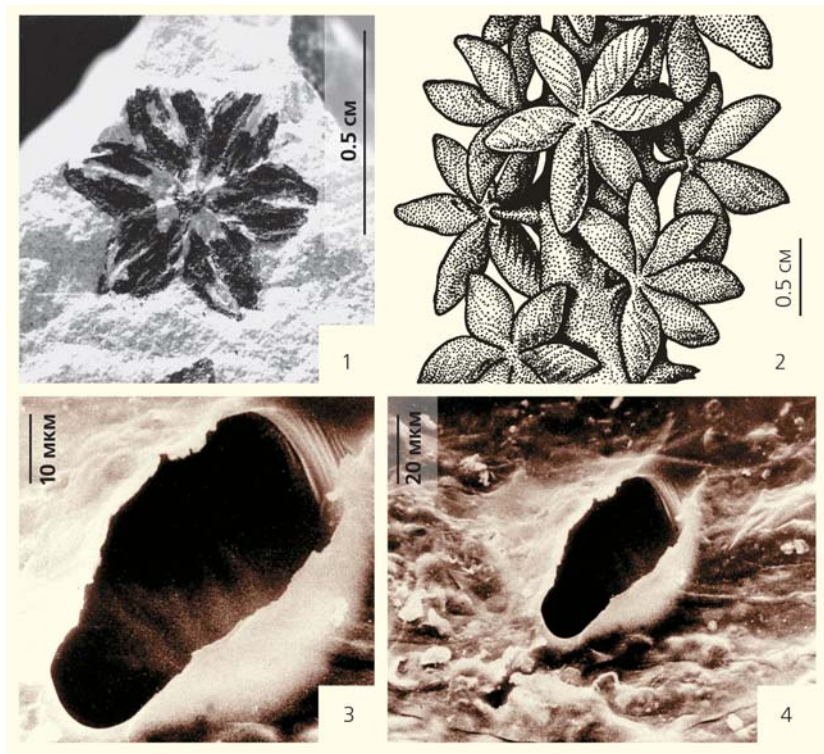
но иначе зачем тогда эти секреторные органы?

Мы с А.А.Оскольским, моим коллегой из Ботанического института РАН, рассудили, что гипотеза о насекомом опылении, или энтомофилии, пельтаспермовых вполне имеет право на существование, и посвятили этой проблеме специальную статью, опубликованную на страницах международного ботанического журнала *Wulfenia* [8].

Мимикрия

Конечно же, не надо забывать, что и между самими насекомыми в лесах позднего палеозоя велась жестокая и напряженная борьба за существование. Правила этой борьбы были просты: если атакуешь, то будь быстрее и сильнее жертвы, если защищаешься — создавай плотные надежные покровы (панцирь) или прячься так, чтобы не нашли.

Похоже, именно в пышных лесах каменноугольного периода у насекомых впервые появилась новая стратегия выживания:



Мужские фруктификации *Permothea* spp. из отложений кунгурского яруса нижней перми Приуралья (местонахождение Чекарда-1): 1 — макроморфологическое строение синангия; 2 — реконструкция средней части кистевидного собрания синангиев; 3, 4 — прокол стенки спорангия.

маскироваться под листья или кору процветавших в карбоне споровых и голосеменных растений. Эта мода была подхвачена и продолжена насекомыми пермского периода.

Давайте посмотрим на жилки крыльев и надкрыльев пермского таракана. Тараканы того времени были под стать современным мадагаскарским, а то и крупнее. Жилки на тараканьем крылышке любому палеоботанику покажутся знакомыми, и не удивительно, ведь они почти точь-в-точь повторяют жилкование перышек ваий пельтаспермовых из формально-морфологической группы каллиптерид. Чтобы укрыться от зорких глаз хищника, таракану было достаточно замереть на листе пермокаллиптериса (*Permocallipteris*), и происходило чудо: взор хищника равнодушно, ничего не замечая, скользил по растению, на котором играли солнечные блики и тени ветвей.

А хищников, готовых полакомиться вкусным сочным тараканом, в лесах пермского периода было полным-полно. Это и амфибии, мелкие и крупные, чувствовавшие себя в конце палеозойской эры на суше не менее уверенно, чем в воде; и рептилии, стремительно перебегавшие из тени в тень в поисках добычи; и даже свои же собратья — насекомые, например гигантские хищные стрекозы меганевриды.

На мелководье пермских озер и лагун покачивались над водой побеги клинолистников сфенофиллов, а по ним то тут, то там ползали скорпионницы петромантисы. Им можно было чувствовать себя вполне спокойно: ведь когда они расправляли крылья в стороны, получалась точная копия розетки листьев сфенофилла, и никакой хищник их не замечал.

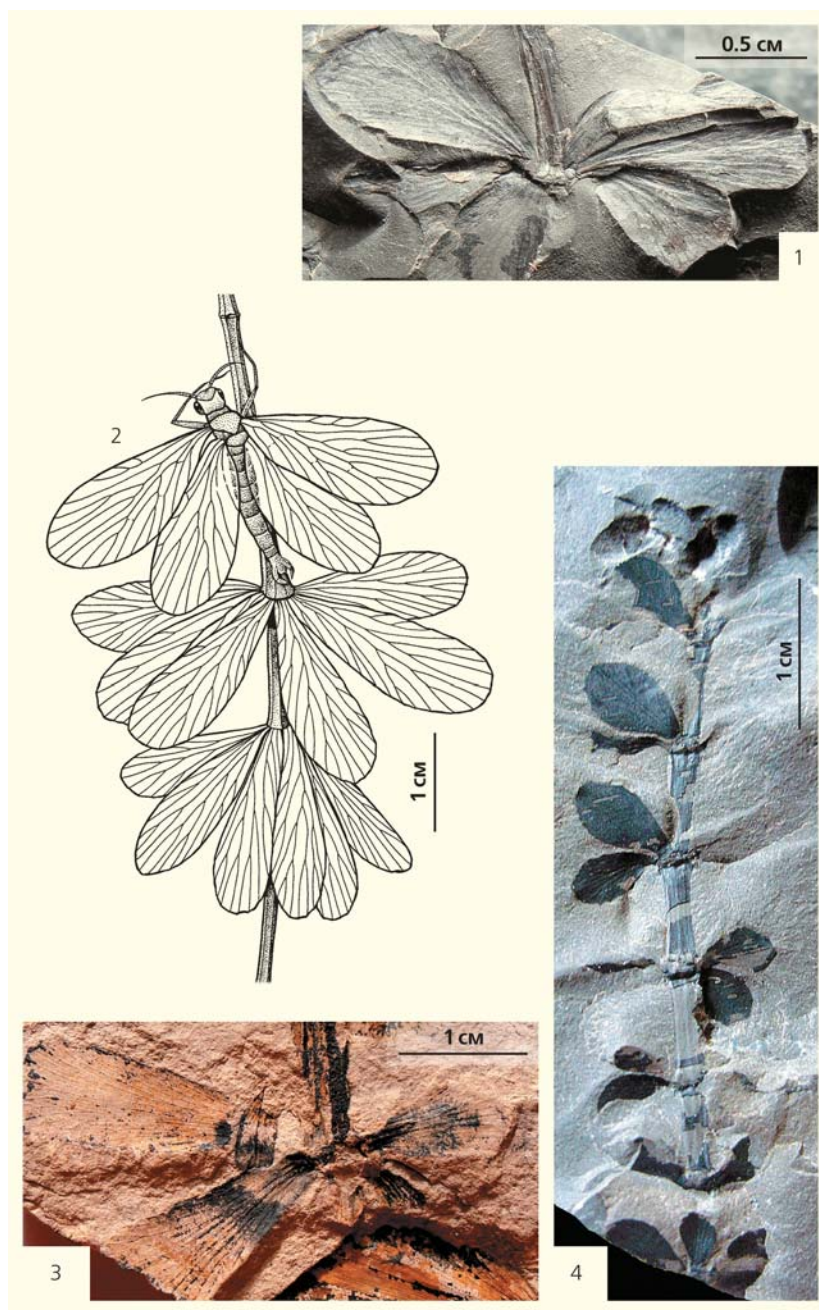
В палеонтологии известны счастливые случаи находок насекомых с сохранившейся окраской крыльев. Удивительно, но таких случаев не так уж и мало. Вот, например, великолепно сохранившийся отпечаток дунбарии (*Dunbaria*), родственницы нашей парадунбарии. Ее нашли в нижнепермских отложениях Канзаса [9]. На крыльях этого интересного насекомого прекрасно видны широкие темные поперечные полосы, соответ-



Листья каллиптерид и позднепалеозойские тараканы: 1 — крыло таракана из пермских отложений Печорского угольного бассейна, 2 — перистый лист пельтаспермового *Permocallipteris retensoria*, 3 — позднепалеозойский таракан *Phylloblatta* на вайе птеридосперма (реконструкция таракана по [12]); 4, 6 — таракан *Kunguroblattina microdictya* из нижнепермских отложений Приуралья (по [13]), 5 — перышко (сегмент последнего порядка) пельтаспермового *Permocallipteris adzvensis* из среднепермских отложений (казанский ярус) Печорского угольного бассейна.

вующие прижизненной пигментации. Зачем эти полосы были нужны?

Конечно же, это не мимикрия в полном смысле слова, но, тем не менее, тоже пример ловкой и эффективной маскировки. Это так называемая расчленяющая окраска. Вспомним камуфляж маскхлатов разведчиков, пятна на шкуре леопарда или полосы на шкуре зебры или тигра. Все они служат одной и той же цели: помочь животному спрятаться, стать незаметным. Одним животным это требуется для того, чтобы незаметно подкрасться и напасть, другим — чтобы не быть обнаруженным хищником.



Мимикрия пермских скорпионниц: 1 — розетка листьев *Sphenophyllum comiense* из пермских отложений Печорского бассейна, 2 — *Petromantis sylvaensis* на побеге *Sphenophyllum biarmicum* (морфология петромантиса дана по [14]), 3 — розетка листьев *S. biarmicum* из пермских отложений Приуралья, 4 — облиственный побег *S. comiense* из пермских отложений Печорского бассейна.

Из желающих остаться незаметными можно вспомнить еще одну группу пермских насекомых гриллоблаттид. В лесах пермского периода жили представители рода тильярдембии (*Tillyardembia*). Этим насекомым яркая окраска была совершенно ни к чему. Тильярдембии, по мнению палеознто-мологов, обитали в лесной подстилке, ползая среди мха и опавших листьев.

Яйцекладки

Проблема индивидуального выживания в животном и растительном мире тесно смыкается с не менее важной проблемой размножения. Что толку, если ты выжил здесь и сейчас, но не оставил потомства?

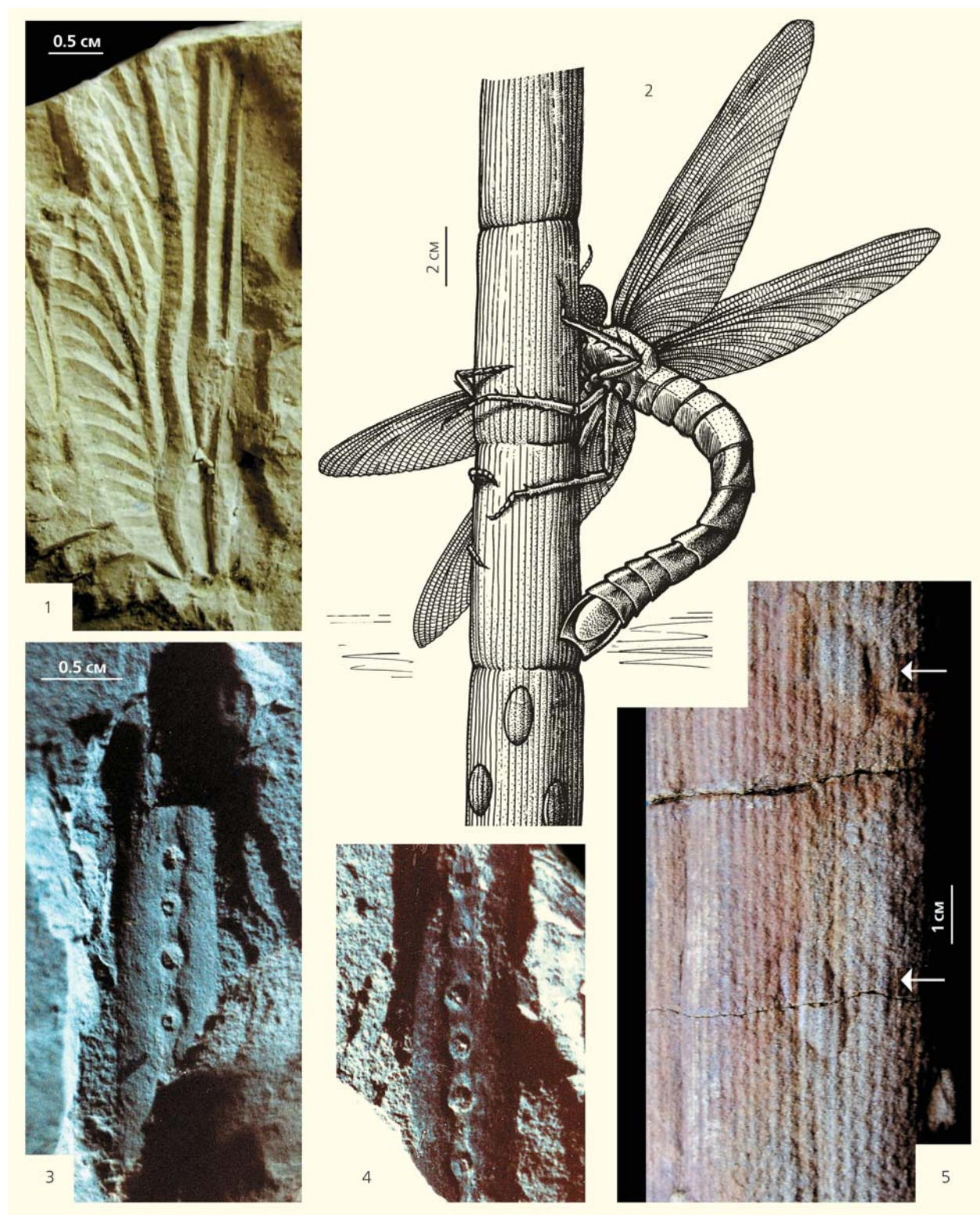
И здесь насекомые и растения вновь оказываются рядом. Яйца, отложенные кем-то из собратьев-насекомых, любой хищник воспримет как щедрый подарок судьбы. Еще бы — бесплатный лакомый белок безо всякой охраны подали вам буквально на блюдечке! Поэтому задача — сохранить потомство и надежно спрятать яйцекладку куда-нибудь подальше, но так, чтобы личинки не задохнулись и не погибли, — стала для многих первоочередной.

Но куда же спрятать яйцекладку? Одно из наиболее подходящих укромных мест — желобок в рахисе листа (т.е. в осевой его части, продолжающей черешок) крупного папоротника или птеридосперма, желательнее поближе к основанию, подальше от пытливых глаз голодного хищника. Или, как вариант, прикопать яйца в почву, слегка присыпав их растительной трухой и перегноем. И надежно, и просто, и тепло: гниющие растения согревают яйца, помогая им развиваться. Но лучше всего, конечно же, отложить яйца на побег какого-нибудь растения, до которого никто не доберется...

Несколько лет назад мы сплавлялись по очень живописной уральской реке Сылве. По ее берегам, покрытым дремучей тайгой с вековыми елями, то тут, то там расположены обнажения терригенных пород пермского возраста, содержащих самые

разнообразные и нередко хорошо сохранившиеся ископаемые остатки животных и растений.

Сделав одну из остановок у деревни Урма, мы прошли вдоль берега Сылвы, приглядываясь к выходам песчаников артинского яруса. Вскоре я сделал замечательную находку: мощный, около 5 см в диаметре, и довольно длинный фрагмент побега, да даже и не побега, а ствола древнего пред-



Стрекозы и их яйцекладки: 1 — крыло крупной стрекозы-меганевриды *Arctotypus* sp. из пермских отложений Приуралья (местонахождение Тюлькино); 2 — реконструкция стрекозы-меганевриды *Arctotypus*, откладывающей яйца на побеге паракаламита (по находке у д.Урма, р.Сылва, Пермский край); 3, 4 — яйцекладка стрекозы в желобке на рахисе птеридосперма из отложений кунгурского яруса нижней перми Приуралья (местонахождение Чекарда-1); 5 — яйцекладка стрекозы-меганевриды (отмечена стрелками) на стволе паракаламита из отложений артинского яруса нижней перми Приуралья (местонахождение Урма-2).

ставителя хвоцевидных — паракаламита (*Paracalamites*). Внимательно осмотрев образец, я пришел уже в полнейший восторг: на поверхности ствола паракаламита были прекрасно видны огромные яйца, отложенные каким-то великаном из мира насекомых пермского периода. Долго гадать не пришлось: после работы с литературой и сравнения яйцекладок из Урмы с подобными находками из отложений другого возраста и из других регионов [10] удалось установить, что яйцекладка была оставлена гигантской стрекозой-меганевридой, скорее всего относящейся к роду арктотипус (*Arctotypus*). Отдельные крылья и даже целые арктотипусы время от времени встречаются здесь же — в пермских отложениях по берегам Сылвы и других уральских рек.

Очевидно, яйца были отложены на крупном паракаламите, ствол которого торчал из воды где-то на мелководье пермской лагуны или озера. До-

браться до такой яйцекладки какому-нибудь наземному хищнику было просто невозможно.

* * *

Эпизоды из совместной истории палеозойских растений и насекомых, на мой взгляд, вполне красноречиво свидетельствуют в пользу прямой выгоды симбиотических взаимоотношений между различными компонентами экосистем даже в тех заведомо простых случаях, когда эти компоненты связаны только трофическими интересами. В том же случае, когда возникает такая форма симбиоза, как мутуализм, т.е. взаимовыгодное сотрудничество перед лицом бесконечных внешних угроз, возможности для выживания у обоих участников подобного союза резко возрастают. Хороший пример нам, людям, для решения насущных проблем в нашем непростом современном мире. ■

Работа выполнена в рамках исследовательских проектов Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. Наугольных С.В., Пономаренко А.Г. Предполагаемые следы питания жуков в древесине кониферофита из казанского яруса Прикамья // Палеонтологический журнал. 2010. №4. С.105–110.
2. Шаров А.Г. Морфологические особенности и образ жизни палеодиктиоптер // Докл. на двадцать четвертом ежегодном чтении памяти Н.А.Холодковского. Вопросы палеонтологии насекомых. Л., 1973. С.49–63.
3. Zalesky M.D. Sur la distinction de l'étage Barden dans le Permien de l'Oural et sur sa flore fossile // Problems of Paleontology. 1937. V.2-3. P.37–101.
4. Meyen S.V. Permian conifers of Western Angaraland // Rev. Palaeobot. Palynol. 1997. V.96. P.351–447.
5. Наугольных С.В. Флора кунгурского яруса Среднего Приуралья. М., 1998 (Тр. Геологического ин-та РАН. Вып.509).
6. Naugolnykh S.V. *Vetlugospermum* and *Vetlugospermaceae*: a new genus and family of peltasperms from the Lower Triassic of Moscow syncline (Russia) // Geobios. 2012. V.45. P.451–462.
7. Мейен С.В. Систематика пельтаспермовых птеридоспермов и их место в филогении голосеменных // Бюлл. МОИП. Отд. биол. 1983. Т.88. №1. С.3–14.
8. Naugolnykh S.V., Oskolski A.A. An advanced peltasperm *Permoxylocarpus trojanus* Naug. from the Lower Permian of the Urals (Russia): an ancient case of entomophily in gymnosperms? // Wulfenia. 2010. V.17. P.29–43.
9. Dunbar K.O. Historical geology. NY; L., 1960.
10. Vasilenko D.V., Rasnitsyn A.P. Fossil ovipositions of dragonflies: review and interpretation // Paleontological Journal. 2007. V.41. №11. P.1156–1161.
11. Историческое развитие класса насекомых / Ред. Б.Б.Родендорф, А.П.Расницын. М., 1980.
12. Guthörl P. Das Leben in den Süßwasserbecken und anderen Strand während der Rotliegendzeit im Saar-Nahe-Pfalz-Gebiet // Saarbrücker Bergmannskalender. 1948. S.45–64.
13. Вишнякова В.Н. Новые виды рода *Kunguroblattina* из нижней перми Приуралья // Палеонтологический журнал. 1965. №4. С.50–59.
14. Novokshonov V.G. New and little known Permian scorpion flies (Insecta, Mecoptera = Panorpidia) of the family Agetopanorpidae from Perm and Arkhangel'sk oblasts // Paleontological Journal. 1993. V.27. №1A. P.70–89.

Техника спектроскопии звезд — первые 200 лет

*...Распялил луч в трехгранности стекла,
сквозь трещины распластанного спектра
туманностей исследовал состав...*

М.Волошин. Путями Канна

В.Е.Панчук, В.Г.Клочкова

Астрофизика опирается на «трех китов»: спектроскопию звезд и туманностей, теорию излучения и теорию атома. Оптическая спектроскопия звезд — источник сведений о химическом составе звезд, о кинематическом состоянии звездных атмосфер и оболочек, о движениях звезд в Галактике. Способствуя развитию представлений о формировании и эволюции звезд различных масс, о химическом составе различных звездных популяций в галактиках, спектроскопия поставляла эмпирический материал со значительным опережением. Методы спектроскопии всегда были основаны на высоких технологиях своего времени. Первые спектроскопические наблюдения звезд были выполнены в 1817 г.



Владимир Евгеньевич Панчук, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН (пос.Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика); преподает в Университете информационных технологий механики и оптики (Санкт-Петербург). Научные интересы связаны с астрономическим приборостроением, спектроскопией звезд, физикой звездных атмосфер.



Валентина Георгиевна Клочкова, доктор физико-математических наук, профессор, заведующая лабораторией астроспектроскопии САО РАН. Известный специалист в области спектроскопии звезд, звездной эволюции, звездного нуклеосинтеза.

Становление

Астрономическая спектроскопия, бесспорно, появилась раньше физической, лабораторной. Можно только дискутировать, откуда пошло их общее начало. Принято считать, что первые опыты с призмой принадлежат И.Ньютону (1666). Эффект формирования радужной полосы с помощью призмы был известен и ранее, но в предыдущих попытках (например, предпринятых Р.Декартом) объяснить его предполагалось тем, что белый свет становится цветным

Ключевые слова: оптика, призма, дифракционная решетка, спектрограф, телескоп, спектры звезд.

Key words: optics, prism, diffraction grating, spectrograph, telescope, spectra of stars.

только в результате преломления, а цвет зависит от угла преломления. Ньютон выполнил критический эксперимент с двумя призмами, у которых дисперсия (т.е. зависимость показателя преломления от длины волны) работала в противоположных направлениях, и показал, что лучи разного цвета присутствуют в составе белого света. Но в XVII в. опыты Ньютона с комбинированием различных оптических элементов не получили развития. Лишь в 1752 г. Т.Мелвилл обнаружил, что различные соли, помещаемые в пламя, при рассмотрении через призму дают разнообразные спектры. Например, обычная поваренная соль формирует «яркий желтый» цвет. Более того, в экспериментах наблюдались не все цвета радуги, для некоторых веществ в радужной полоске образовывались темные провалы. Напомним, что газовая горелка Р.Бунзена и Г.Роскоу была использована спустя столетие (1857). В 1802 г. У.Воластон нашел в спектре Солн-

ца семь темных деталей (провалов), которые он интерпретировал как границы естественных цветов [1]. Эти детали наблюдались в том случае, когда солнечный свет проходил через узкую щель. Поскольку щель и призма — компоненты спектрального прибора, эксперимент Волластона также можно рассматривать как первый шаг в спектроскопическом приборостроении. Следующим стало применение зрительной трубы, оптика которой развивалась к тому времени уже почти 200 лет.

Зрительную трубу, состоящую из двух линз (объектив и окуляр), изобрел в 1608 г. голландский оптик Г.Липперсейм. До первых наблюдений Г.Галилея зрительные трубы в качестве телескопа уже использовались Т.Гарриотом и С.Мариусом. Будучи прекрасным интерпретатором и популяризатором, Галилей вошел в историю и как изобретатель телескопа-рефрактора (1610). Одиночная линза строит окрашенное изображение, т.е. обладает хроматической аберрацией. Если увеличивать фокусное расстояние (F) линзы, сохраняя ее диаметр (D), то хроматическая аберрация снизится до уровня дифракционных искажений, обусловленных конечным размером оправы объектива. Поэтому во второй половине XVII в. воздушные телескопы с однолинзовыми объективами достигали длины в десятки метров, например: у братьев Гюйгенсов $F = 37$ м, у Я.Гевелия — 45 м, а у Дж.Брадлея — 65 м. В 1733 г. Ч.М.Холл открыл двухлинзовую комбинацию стекол (легкий крон + тяжелый флинт), формирующую неокрашенные изображения. Отливки из флинта (с примесью окиси свинца) долгое время получались оптически неоднородными, и качество изображений было неудовлетворительным. Ахроматический двухлинзовый объектив по идеям Холла был запатентован Дж.Доллондом в 1758 г. Но только в начале XIX в. швейцарец П.Гинан усовершенствовал технологию производства этих сортов стекол. Позже соответствующее стекольное производство обосновалось в Париже, а после революции 1848 г. оно переместилось в Англию, где использование профессиональных секретов Гинана и его наследников резко повысило качество оптики местного производства. Двухлинзовые объективы (дублеты) обладали хроматической аберрацией в 16 раз меньше, чем однолинзовые, телескопы стали светосильными (увеличилось отношение D/F), трубы телескопов укоротились более чем в 10 раз. Метод исправления хроматической аберрации не только продвинул качество рефракторов, но и обеспечил принципиальную возможность создания первых информативных спектральных приборов.

Развитие оптического приборостроения зависело не только от преодоления технологических трудностей, но и от экономических и политических обстоятельств. Так, в большинстве европейских государств до 1845 г. были весьма высокие налоги на производство стекла: оно считалось предметом роскоши. А эмбарго на ввоз товаров из

Англии способствовало независимому развитию стекловарения в Германии. Баварец Й.Фраунгофер, консультируясь у Гинана, с 1809 г. начал совершенствовать методы контроля при производстве стекла различных сортов. Фраунгоферу необходимо было сформировать набор длин волн, на которых следовало измерять показатели преломления стекол [2]. Первый астрономический спектроскоп состоял из цилиндрической линзы, 60-градусной призмы из флинта и небольшого теодолита ($D = 2.5$ см). В спектре Солнца были измерены положения 324 спектральных линий. Некоторые провалы, обнаруженные Волластоном, оказались состоящими из тесно расположенных линий. В 1817 г. Фраунгофер усовершенствовал свой спектроскоп, установив призму с углом $\sim 38^\circ$, и наблюдениям стали доступны планеты и яркие звезды (Сириус, Капелла, Бетельгейзе). С 1823 г. он стал использовать рефрактор ($D = 10$ см) с предобъективной призмой и обнаружил линии в спектрах шести звезд. Отмечая сходство спектров Солнца, Луны и планет, ученый предположил, что каждая звезда обладает уникальным набором линий. Последнее послужило доказательством, что фраунгоферов спектр формируется вне атмосферы Земли. Итак, первым результатам в области спектроскопии звезд в немалой степени способствовали потребности оптического производства, высокие налоги на стекло и межгосударственные санкции. После Фраунгофера в течение 40 лет все попытки исследовать спектры звезд оказались неудачными.

Еще в 1815 г. Фраунгофер обнаружил, что положение яркой желтой линии, наблюдаемой в спектре пламени масляной горелки, совпадает с положением темной линии в спектре Солнца. В 1849 г. Л.Фуко отождествил эту линию в спектре натрия. Эти результаты послужили основой для опытов Г.Р.Кирхгофа и формулировки принципа спектрального анализа в 1859 г. («...соответствие между спектром и качеством излучающего источника» позволяет «по свету, который посылает тело, заключить о его химическом составе...»).

Инвентаризация звезд

В 1855 г. А.Секки начал наблюдения на окулярном спектроскопе системы Фраунгофера в сочетании с большим рефрактором Мерца ($D = 24$ см). Кроме того, Секки использовал 12-градусную призму перед объективом небольшого телескопа, закрепленного параллельно рефрактору. Во Флоренции, у астронома, оптики и ботаника Дж.Амичи, обучался Дж.Донати, одним из первых применивший спектроскоп для наблюдений звезд и комет. Донати использовал линзу ($D = 41$ см), обладавшую значительным хроматизмом, в комбинации с цилиндрической линзой, расположенной на входе спектроскопа (1860). Исследуя спектры 15 звезд, Донати обнаружил взаимосвязь набора спектральных ли-

ний с цветом звезды. В 1860 г. Амичи изобрел призму прямого зрения и усовершенствовал спектроскоп Фраунгофера [3]. Применяя окулярный спектроскоп с двойной призмой Амичи, Секки составил второй каталог спектров. Большинство из 316 звезд было разделено на три типа (белые, желтые и красные), но основой классификации стал не цвет звезды, а вид фраунгоферова спектра. Из спектроскопических соображений Секки пришел к выводу, что Солнце — это одна из звезд. В спектрах звезд первого типа отождествлялись три линии водорода (рис.1). Затем был выделен четвертый тип — звезды с широкими темными полосами (известные сегодня как углеродные звезды).

Техника фотографирования, развивавшаяся в течение XIX в. (первый снимок на бумаге сделал еще в 1816 г. Ж.Ньепс), активно использовалась астрономами. Дагерротипию для изучения призмного спектра Солнца применил Дж.Гершель в 1842 г., фотографию Веги на мокрых коллоидных пластинках получили в 1850 г. У. и Дж.Бонды. В 1872 г. декан медицинского факультета Городского университета Нью-Йорка Г.Дрепер получил на мокрых коллоидных пластинках первую фотографию звездного спектра — для той же Веги; на нем были видны темные линии. Позже, в собственной обсерватории, на телескопе с предобъективной призмой и сухими броможелатиновыми пластинками, Дрепер снял спектры более 10 тыс. звезд, а в 1879 г. достиг величины спектрального разрешения $R = \lambda/\Delta\lambda = 5000$ (λ — длина волны, $\Delta\lambda$ — минимально различимый интервал между двумя линиями). Должность декана приносила доходы, и после смерти Дрепера (1882) его вдова Анна основала фонд, средства которого были направлены на проведение беспрецедентного спектроскопического обзора профессионалами обсерватории Гарвардского колледжа. Первые эксперименты по фотографической призмной спектроскопии начались в 1885 г. Фотографический дублет ($D = 20$ см, $F = 114$ см) строил 10-градусное поле на фотопластинке 20×25 см (рис.2). С 13-градусной предобъективной призмой спектры звезд шестой величины регистрировались за пять минут.

Первая программа наблюдений была завершена к 1889 г., спустя год директор Гарвардской обсерватории Э.Пикеринг опубликовал первую часть каталога HD (Henry Draper), содержащего спектральную классификацию 10 351 звезды [4]. Основной объем работ со звездными данными выполнили сотрудники Пикеринга В.Флеминг, А.Мори, А.Кэннон (всего у него работало около 20 сотрудников). Изме-

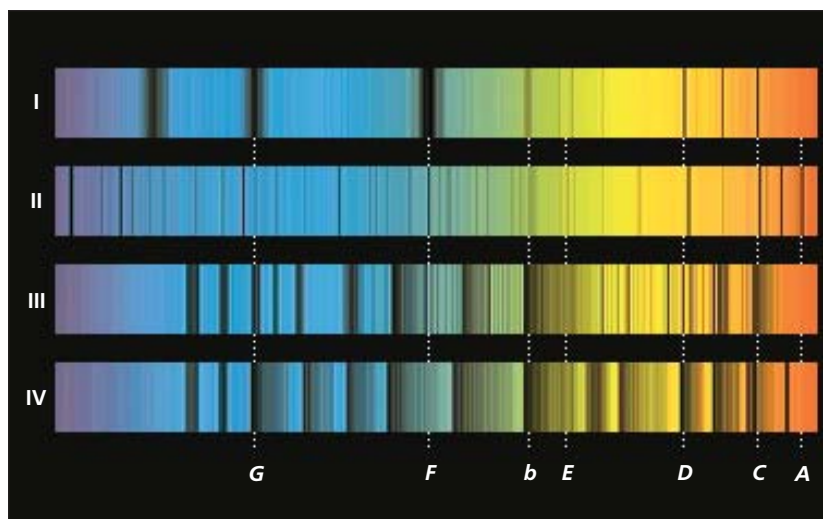


Рис.1. Четыре класса спектров звезд по Секки. Обозначения спектральных линий по Фраунгоферу.

рения интенсивности спектральных линий выполнялись методом визуальных оценок. Южное небо (рис.2) фотографировали на телескопе, установленном в Арекипе (Перу). С 1918 по 1924 г. был опубликован каталог спектров 225 тыс. звезд до девятой величины включительно. Последовательность спектральных классов отражала изменение температуры звездных атмосфер.

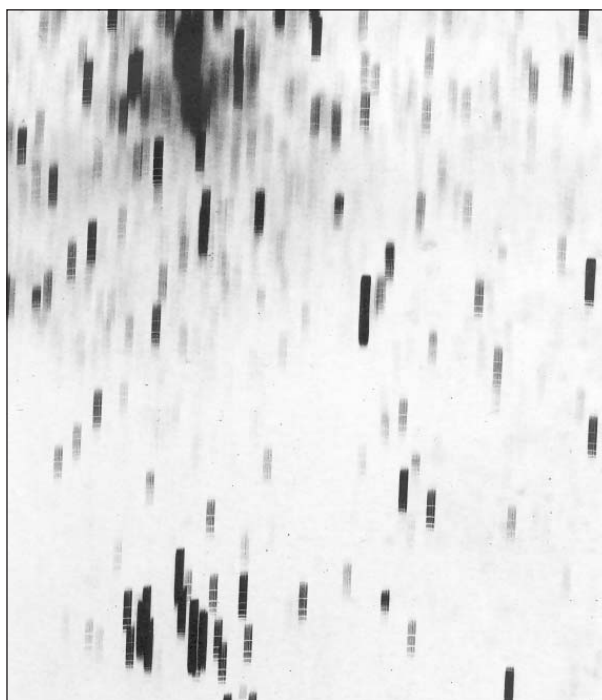


Рис.2. Фрагмент фотопластинки (негатив), полученной с предобъективной призмой. На спектрах видны абсорбции бальмеровской серии водорода. Область в созвездии Корвы (Carinae).

Щелевые спектры

Качество бесщелевых призмных спектров зависит от четкости звездных изображений и точности сопровождения объекта. На фотопластинке одновременно регистрировались спектры нескольких сотен звезд (рис.2), и спектральная классификация проводилась по соотношениям интенсивностей линий. Для измерений положений линий на фотографической спектрограмме необходимо зафиксировать изображение звезды на входе спектрографа (используя щель, как в спектрографе Фраунгофера) и через эту же щель зарегистрировать спектр сравнения с известными значениями длин волн линий. Тогда регистрируется спектр только одной звезды, попадающей в щель, но открывается возможность найти значения длин волн линий, необходимые для определения сме-

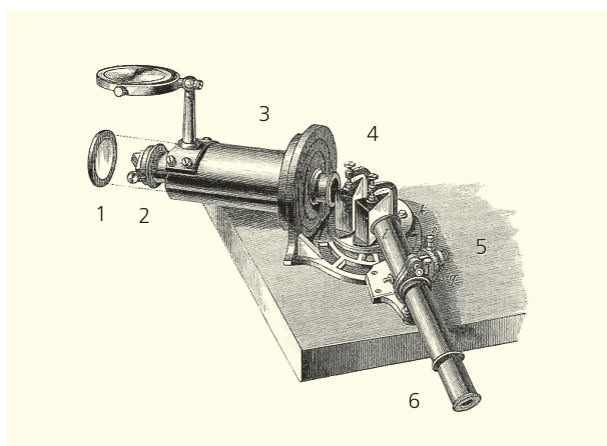


Рис.3. Спектроскоп Хэггинса: 1 — цилиндрическая линза, 2 — узел щели, 3 — коллиматор, 4 — блок призм, 5 — микрометр, 6 — окуляр.

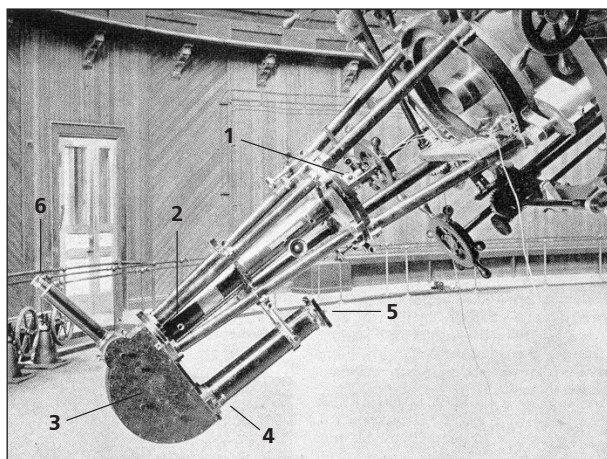


Рис.4. Трехпризмный щелевой спектрограф, установленный на окулярной части рефрактора Ликской обсерватории: 1 — узел щели, 2 — объектив коллиматора, 3 — блок призм, 4 — объектив камеры, 5 — кассета, 6 — окуляр.

щения вследствие эффекта Доплера. О возможности измерять доплеровские смещения указывал еще Секки, первые визуальные измерения выполнил астроном-любитель В.Хэггинс [5], более известный пионерными работами по отождествлению линий химических элементов в спектрах звезд и туманностей. Использовался рефрактор ($D = 38$ см), двухпризмный окулярный спектроскоп (рис.3), источником водородного спектра служила гейслерова трубка. В 1872 г. Хэггинс довел ошибку визуальных измерений доплеровских смещений до 8 км/с.

Телескопы-рефракторы XIX в. создавались как для визуальных наблюдений, так и с объективами, хроматическая аберрация которых была исправлена для фотографических наблюдений. В конце столетия на больших рефракторах обсерваторий Йеркса (США, $D = 102$ см), Лика (США, $D = 91$ см), Потсдама (Пруссия, $D = 80$ см), Медона (Франция, $D = 83$ см), Пулковы (Россия, $D = 76$ см) были установлены щелевые призмные спектрографы (рис.4). На щелевом спектрографе регистрируется один спектр, поэтому остаточный хроматизм линзового объектива спектрографа исправляли, наклоняя кассетную часть. По доплеровскому смещению линий удастся измерить скорость движения звезды вдоль луча зрения. Программы измерения лучевых скоростей звезд были стимулированы интересом к изучению двойных систем, при этом были открыты пульсации звездных атмосфер. В отличие от бесщелевых спектров, на которых была построена одномерная Гарвардская классификация, качество щелевых спектрограмм было выше. Щелевые спектрограммы, полученные на однометровом рефракторе обсерватории Йеркса, послужили основой для двумерной (по температуре и светимости) спектральной классификации МКК (авторы У.Морган, Ф.Кинан и Э.Келман), опубликованной в 1943 г.

Свободные от хроматической аберрации рефлекторы стали основным средством спектроскопических исследований в начале XX в. В 1904 г. Дж.Э.Хэйл основал первую обсерваторию (Маунт Вилсон, США), где предполагалось собранный телескопом свет исследовать в комфортных лабораторных условиях. Прежде всего из окрестностей Чикаго был перенесен башенный солнечный телескоп. В 1908 г. в обсерватории начал работу телескоп-рефлектор диаметром $D = 1.5$ м, значительная часть наблюдательного времени которого была использована для спектроскопии звезд. Неподвижный фокус куда (в который свет, собираемый движущимся телескопом, передается системой зеркал) был изобретен в Парижской обсерватории еще в середине XIX в., а в 1910 г. фокус куда 1.5-метрового рефлектора Маунт Вилсон оснастили призмным автоколлимационным спектрографом с фокусным расстоянием 5.5 м. На этом спектрографе были исследованы спектры ярких звезд с величиной спектрального разрешения $R = 70\,000$,

что позволило получить первые представления о движениях вещества в звездных атмосферах. Вторым звездным спектрографом 1.5-метрового телескопа стал подвесной трехпризменный прибор (рис.5), один из самых продуктивных спектрографов первой половины XX в.

От рефракции к дифракции

Уже через год после экспериментов Ньютона с призмой Дж.Грегори обнаружил окрашивание белого света при просвечивании природной дифракционной решетки — птичьего пера. Но первую искусственную дифракционную решетку изготовил в 1785 г. Д.Риттенхауз, закрепляя на рамке волоски на одинаковых расстояниях параллельно друг другу. Фраунгофер в 1821 г. заменил волоски на тонкие проволоочки, а затем использовал систему тонких царапин на стеклянной пластинке. В 1882 г. Г.Роуланд описал свое изобретение винтовой делительной машины (рис.6), позволяющей смещать нарезаемую заготовку на величину порядка тысячной доли миллиметра. С помощью делительной машины на металлической или стеклянной поверхности алмазным резцом наносились равноотстоящие тонкие штрихи. На своей машине Роуланд довел плотность нарезки до 787 штрихов на 1 мм. Он также изобрел и изготовил в Балтиморе вогнутую дифракционную решетку (1882). В 1888 г. Роуланд опубликовал подробный фотографический атлас спектра Солнца, общей длиной около 20 м. Это позволило определить длины волн линий с точностью до 0.01 \AA и составить соответствующие таблицы (1898). Он же разработал теорию плоской дифракционной решетки (1893), где впервые появилась известная формула $d \sin \phi = k \lambda$ (здесь d — период решетки, ϕ — угол между направлениями распространения исходного луча и наблюдения, т.е. левая часть представляет собой разность хода между волнами с соседних штрихов, которая в случае равенства целому числу длин волн обеспечивает максимум интенсивности отраженного света за счет интерференции; такое k называется порядком дифракции, или, применительно к спектроскопии, порядком спектра).

Подобные решетки концентрировали значительную часть света в нулевом порядке дифракции (он общий для всех длин волн, и разложение в спектр здесь не происходит), поэтому звездные спектрографы, оснащенные такими решетками, по световой эффективности серьезно уступали призменным. В 1907 г. Дж.У.Стретт (Рэлей) показал, что решетки с профили-

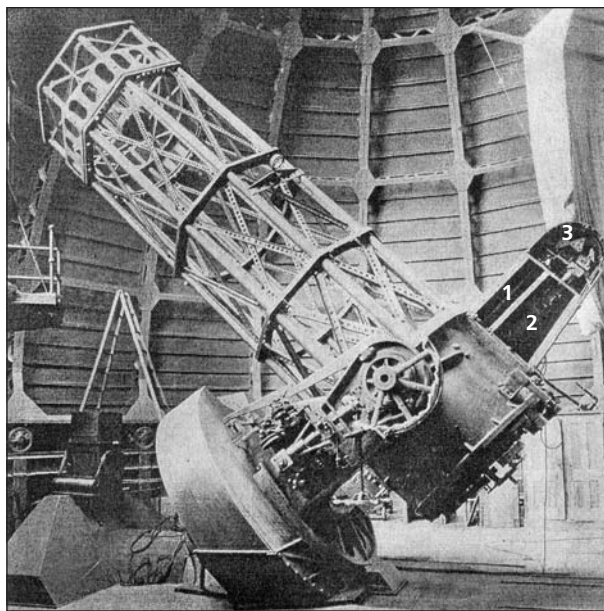


Рис.5. Трехпризменный подвесной спектрограф, установленный на 1.5-метровом телескопе обсерватории Маунт Вилсон. Боковая крышка спектрографа снята. Отсеки: 1 — коллиматора, 2 — камеры, 3 — блока призм.

рованным штрихом (когда рабочими элементами служат не промежутки между царапинами, а собственно грани штрихов) могут обеспечить высокую концентрацию энергии в заданном спектральном порядке. Позже идею Рэрея реализовал Р.Вуд, изготовив дифракционные решетки с заданной формой штриха.

Спектрограф фокуса кудэ 2.5-метрового телескопа обсерватории Маунт Вилсон, работавший с 1917 г. с призмами в автоколлимационном варианте, в 1931 г. был реконструирован [6]. Для этого спектрографа в 1935 г. Р.Вуд изготовил дифракционную решетку (590 штрихов/мм) с рекордной концентрацией света (48%) во втором порядке. Это сразу привело Т.Данэма к открытию узких межзве-

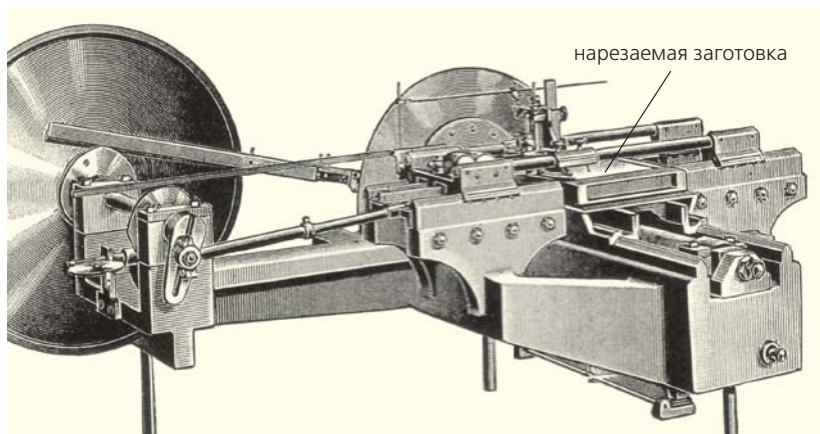


Рис.6. Делительная машина Роуланда.



Рис.7. Один из авторов статьи за рефлектором, оснащенным сканирующим дифракционным спектрометром конструкции А.В.Харитоновой. Результаты наблюдений записывались на магнитную ленту (*) и обрабатывались на ЭВМ. Алма-Ата, 1969 г.

здных линий ионизованного титана. Применение плоской дифракционной решетки в фокусе кудэ получило продолжение: с 1949 по 1981 г. было введено полтора десятка кудэ-спектрографов, где дифракционные решетки работали в низких порядках ($k = 1\div 4$).

«Если даже с помощью 200-дюймового телескопа и не сделают новых открытий, он полезен тем, что освободит 100-дюймовый телескоп для решения многих задач». В этой фразе Д.Мак-Лафлина [7] дана высокая оценка 2.5-метровому телескопу обсерватории Маунт Вилсон и в значительной мере работам, выполненным на спектрографе фокуса кудэ. Обладая более высокой угловой дисперсией, дифракционные решетки с середины XX в. вытеснили призмы во всех видах наблюдений с высоким спектральным разрешением. Вогнутые дифракционные решетки с профилированным штрихом использовались в астрономических монохроматорах, где оставались единственным оптическим элементом, искажающим, правда, каждый последовательно регистрируемый элемент спектра. В эпоху одноканальных фотоэлектрических приемников (ФЭУ) советские астрономы широко использовали монохроматоры (рис.7), отсканировав спектры ($R \sim 50\div 100$) значительной части ярких звезд.

Ширина щели — где оптимум?

Теоретическая разрешающая способность дифракционной решетки равна произведению полного числа штрихов N на порядок дифракции k . Поэтому запросы астрономов на изготовление больших нарезных решеток вызывали удивление у оптиков. Например, используемые на 6-метровом телескопе БТА (Большой телескоп азимутальный САО) решетки с заштрихованной областью 360×320 мм и плотностью 600 штрихов/мм имеют теоретическое разрешение $R = 216\,000\div 864\,000$ (в зависимости

от используемого порядка дифракции), а работают со значениями $R \sim 10\,000$ [8]. Дело в том, что теоретическое значение R определено для бесконечно узкой щели, а в щель астрономического спектрографа должна попадать большая часть изображения турбулентного диска звезды. Приведем оценки на примере пионерных наблюдений с высоким спектральным разрешением. В фокусе кудэ 1.52-метрового телескопа ($F = 45.7$ м) масштаб изображений составляет $4''/\text{мм}$. Так как призменный спектрограф автоколлимационный, то такой же масштаб был и на фотопластинке. При секундных изображениях звезд ширина щели

(и ее проекции на фотопластинку) составит 0.25 мм, а спектральное разрешение (на длине волны 4300 \AA) — всего $R \sim 12\,000$. В реальных наблюдениях (при $R = 70\,000$) ширина щели составляла 0.04 мм, что эквивалентно использованию менее 10% собранного телескопом света. На 2.5-метровом телескопе масштаб в фокусе кудэ составляет $2.5''/\text{мм}$, и призменный автоколлимационный спектрограф с такими же характеристиками, что и на 1.5-метровом, окажется еще менее эффективным. Можно показать, что при использовании одного и того же диспергирующего элемента в режиме автоколлимации спектральное разрешение обратно пропорционально произведению диаметра объектива телескопа D на угловые размеры щели s и прямо пропорционально диаметру коллимированного пучка δ спектрографа. Поэтому перенос техники наблюдений с высоким спектральным разрешением на большие телескопы означал увеличение δ , т.е. размеров диспергирующего элемента. Спектрограф фокуса кудэ 2.5-метрового телескопа обсерватории Маунт Вилсон был оснащен решеткой размером 15×15 см, на спектрографе фокуса кудэ 5-метрового телескопа с 1949 г. использовалась мозаика из четырех таких решеток ($\delta = 30$ см). Технологическим прорывом стало также внедрение в спектроскопию широкоугольных светосильных камер Б.Шмидта и (позже) камер системы Д.Максутова (камера Шмидта оснащена асферической коррекционной пластиной, тогда как камера Максутова — сферическим мениском, что технологичнее). Через пять лет после изобретения камеры Шмидта (1930) спектрограф фокуса кудэ 2.5-метрового телескопа (рис.8) был оснащен одной длиннофокусной ($F = 290$ см) и двумя камерами Шмидта ($F = 185$ см, $F = 81$ см), что позволило согласовать ширину входной щели ($s = 0.047, 0.074, 0.169$ мм, или $0.117'', 0.185'', 0.422''$ соответственно) с элементом разрешения фотоэмульсии (0.03 мм). Спектральное разрешение при этом со-

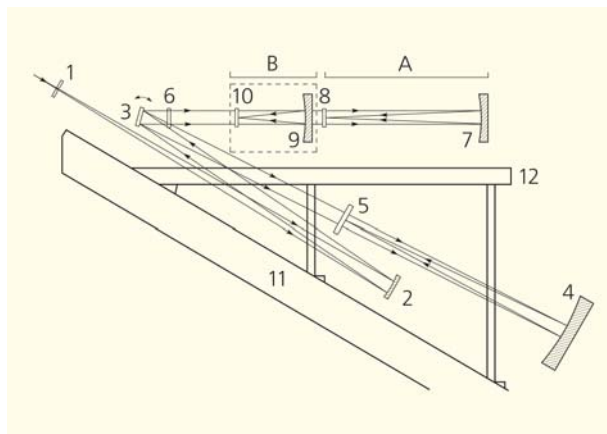


Рис.8. Схема спектрографа фокуса кудэ 2.5-метрового телескопа обсерватории Маунт Вилсон: 1 — щель, 2 — коллиматор, 3 — дифракционная решетка (размер заштрихованной области 15×15 см, 787 штрихов/мм, штрихи перпендикулярны плоскости рисунка), 4 — сферическое зеркало (диаметром $\delta = 91$ см) длиннофокусной ($F = 290$ см) камеры, 5 — касетодержатель длиннофокусной камеры, 6 — сменные коррекционные пластины (для камер А и В), 7 — сферическое зеркало ($\delta = 56$ см) камеры Шмидта «А», среднего фокуса ($F = 185$ см), 8 — касетодержатель камеры «А», 9 — сферическое зеркало ($\delta = 56$ см) камеры Шмидта «В», короткого фокуса ($F = 81$ см), 10 — касетодержатель камеры «В», 11 и 12 — элементы несущей конструкции спектрографа.

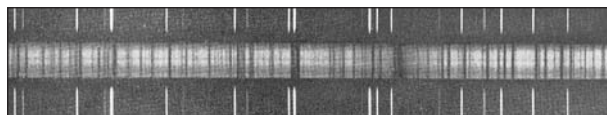


Рис.9. Небольшой фрагмент фотографической спектрограммы (позитив), полученной на спектрографе фокуса кудэ. Яркие линии выше и ниже спектра звезды принадлежат спектру сравнения (ионы FeII). Заметен доплеровский сдвиг темных линий FeII в спектре звезды относительно линий спектра сравнения.

ставляло $R = 46\,000$, $30\,000$ и $13\,000$, но, увы, ценой больших потерь света на входной щели. Небольшой фрагмент фотографической кудэ-спектрограммы приведен на рис.9, длина таких спектров достигала нескольких десятков сантиметров.

Первое миниатюрное оптическое устройство (резатель изображения), позволяющее использовать значительную часть собранного телескопом света без потери спектрального разрешения, изобрел А.Боуэн, первый директор обсерватории Маунт Паломар (США) и конструктор спектрографа фокуса кудэ 5-метрового телескопа. Принцип работы резателя состоит в разделении изображения звезды на узкие полосы, ширина каждой из которых равна ширине щели, согласованной с линейным разрешением светоприемника. На звездных спектрографах 6-метрового телескопа БТА используют оригинальные резатели изображения [8, 9].

Двумерный подход

Линейная дисперсия пропорциональна фокусному расстоянию камеры F и угловой дисперсии дифракционной решетки, а угловая дисперсия, в свою очередь, пропорциональна номеру порядка дифракции k и плотности штриховки. В стремлении к высокому спектральному разрешению мы не можем увеличивать F , так как при этом придется уменьшать ширину щели и терять на входе спектрографа большую часть собранного телескопом света. При нарезании решетки 600 штрихов/мм для звездного спектрографа БТА алмазный резец проходил по тончайшему алюминиевому слою расстояние ~ 700 км! Увеличение плотности штрихов вдвое уже приводит к технологическим трудностям, поэтому остается путь увеличения линейной дисперсии за счет работы с более высокими номерами порядка дифракции k . Порядок дифракции определяется в основном разностью хода лучей, попадающих на рабочие грани соседних штрихов, а та, в свою очередь, — значением угла блеска (угла между нормальными к плоскости решетки и к плоскости рабочей грани штриха), см. рис.10. При нарезании решетки с большим углом блеска штрих должен быть глубоким, т.е. нагрузки на резец возрастают многократно.

Если порядки $k = 1, 2, 3$ формируются при существенно различных углах дифракции для разных длин волн, то порядки $k = 50 \div 100$ видны на близких значениях угла дифракции, т.е. пространственно перекрываются. Развести эти порядки в пространстве можно, добавив в схему спектрографа второй диспергирующий элемент (призму или решетку), плоскость дисперсии которого ортогональна плоскости дисперсии основной решетки. Спектрографы с двумя взаимно ортогональными диспергирующими элементами (метод скрещенной диспер-

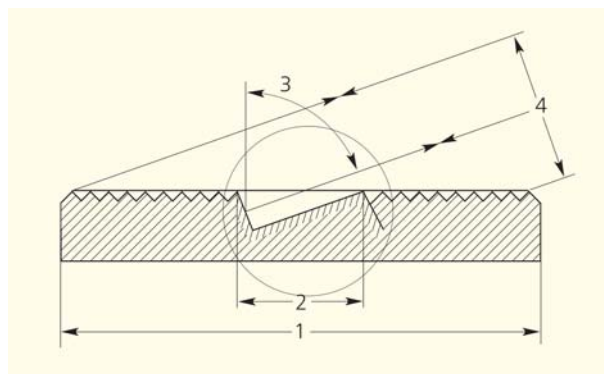


Рис.10. Сравнение профилей дифракционных решеток, работающих в низких и высоких порядках дифракции: 1 — длина нарезанной области, 2 — расстояние между соседними штрихами, 3 — угол блеска, 4 — диаметр коллимированного пучка. В окружности показан профиль одного штриха решетки, работающей в высоких порядках дифракции (эшелле).

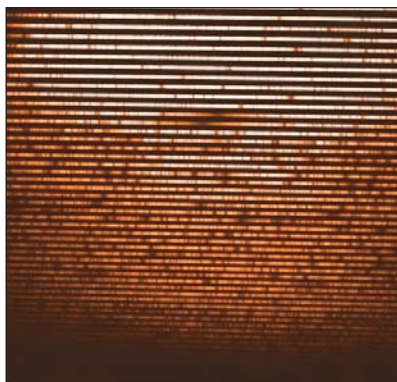


Рис.11. Пример спектра звезды, полученного на спектрографе скрещенной дисперсии БТА [9], $R = 60\,000$. Одновременно регистрируемый диапазон длин волн: от 440 нм (вверху) — до УФ-границы окна атмосферной прозрачности 300 нм (внизу). Выше центра кадра — широкие резонансные линии H и K CaII.

сии) получили широкое распространение из-за высокой угловой дисперсии и небольшой длины каждого спектрального порядка, последнее позволяет регистрировать спектр значительной протяженности на современном светоприемнике — матрице ПЗС (приборе с зарядовой связью, рис.11).

Первый в мире звездный спектрограф скрещенной дисперсии с фотографической регистрацией был разработан крымскими астрофизиками [10], использовавшими результаты Ф.М.Герасимова [11] и его сотрудников из Государственного оптического института имени С.И.Вавилова (ГОИ) по созданию технологии изготовления нарезных дифракционных решеток, в том числе с большими углами блеска. Процесс изготовления большой дифракционной решетки продолжается многие сутки, поэтому для массового производства спектрографов различного назначения в ГОИ была разработана технология репликации решеток (изготовления оттисков с нарезанного оригинала). Более полувек наша страна развивает эти технологии, в частности, БТА оснащен крупноформатными дифракционными решетками и соответствующей спектральной аппаратурой российского производства. Отечественное спектральное приборостроение основал в 20–30-х годах В.К.Прокофьев из ГОИ, с 1956 г. работавший в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР.

Оптоволоконный «переходник»

Оптоволоконное сочленение телескопа и спектрографа впервые было использовано для спектроскопии яркой галактики в 1979 г., и с 1982 г. применяется в многообъектной спектроскопии, где на щель спектрографа среднего разрешения по отдельным световодам подается излучение от избранных объектов, находящихся в поле зрения телескопа. Основное направление здесь — исследование дальней (и ранней) Вселенной. Получаемые при этом спектры слабых звезд переднего фона оказываются полезными «отходами производства». Применение оптического волокна открыло новые возможности и в спектроскопии высокого

разрешения [12]. Во-первых, оптоволоконно обеспечивает освещение входа в спектрограф более однородное и стабильное, чем в режиме удержания изображения звезды на щели спектрографа фокуса кудэ. Во-вторых, увеличивается точность калибровки спектра по длинам волн. Кроме того, спектрограф может быть выполнен по оптимальной стационарной схеме и даже помещен в объем со стабилизированными температурой и давлением.

Спектрографы высокого разрешения, имеющие оптоволоконное сочетание с телескопом, служат инструментом для решения широкого круга задач: для изучения механизмов потери звездного вещества, для использования спектра нерадикальных колебаний как индикатора внутреннего строения звезд, для доплер-зеemanовского картирования звездных атмосфер, для анализа тонкой структуры абсорбционных спектров квазаров, измерения лучевых скоростей звезд с поддержанием высокой точности (несколько м/с) на шкале месяцы–годы. Сегодня в мире работает свыше двух десятков таких спектрографов, наиболее популярный продукт их деятельности — обнаружение доплеровским методом маломассивных спутников звезд (в том числе экзопланет). Под ажиотажную задачу поиска и исследования экзопланет последние 20 лет выделяются большие средства, создаваемые спектральные комплексы используются затем и в более «спокойных» задачах, понятных узкому кругу спектроскопистов.

...И следующие n лет

Из вышеизложенного видно, что с увеличением диаметра телескопа желательно пропорционально увеличить диаметр коллимированного пучка дифракционного спектрографа высокого разрешения. Значение $\delta = 30$ см, достигнутое к середине XX в., остается предельным, поскольку определяется технологией изготовления нарезных дифракционных решеток, возможности которой исчерпаны. Не спасают положение и голографические решетки, как с поверхностным, так и с объемным фазированием (здесь размеры решеток посромнее). П.Жакино показал, что по производству светосилы по потоку L на спектральное разрешение R призма в несколько раз уступает дифракционной решетке, а RL решетки уступает интерферометру более чем на порядок (сравнивались приборы с одинаковой апертурой A) [13]. В астрономической спектроскопии дифракционная решетка заменила призму уже в середине XX в.,

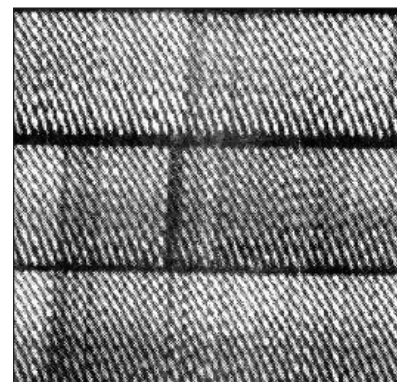
а интерферометры различных типов в качестве основного элемента спектрального прибора высокого разрешения делают только первые шаги. В иерархии этих приборов (призма — дифракционная решетка — интерферометр Фабри—Перо — двухлучевой интерферометр) потенциальное качество увеличивается с уменьшением числа интерферирующих пучков. Заметим, что все спектральные оптические системы объединяет общий принцип — они осуществляют фурье-преобразование излучения. Призмный спектрограф выполняет такое преобразование, формируя простейший сигнал в виде одного спектра. Дифракционный спектрограф выдает более сложный сигнал, представленный в виде двух бесконечных последовательностей спектральных порядков. Двухлучевой интерферометр выполняет простейшее (синусное или косинусное) преобразование, создавая итоговый сигнал в виде интерферограммы. Наиболее экономичный (по потерям света) интерферометрический метод спектроскопических наблюдений появился на полвека раньше, чем цифровые методы обработки сигнала.

Предложено несколько методов интерферометрического измерения спектров, реализующих преимущество интерферометров в величине RL перед дифракционными спектрографами. Если перед щелью дифракционного спектрографа скрещенной дисперсии установить многолучевой интерферометр Фабри—Перо, получим интерферограмму (рис.12), в которой содержится информация со спектральным разрешением, в несколько раз превышающим предельное разрешение этого же спектрографа, используемого без интерферометра.

Если вместо интерферометра Фабри—Перо установить двухлучевой интерферометр белого света с фиксированным сдвигом, каждый элемент спектра будет изображаться в виде вертикальной линии, интенсивность вдоль которой изменяется по более простому (чем в случае с интерферометром Фабри—Перо) синусоидальному закону. Измеряя относительные смещения таких синусоид с известным периодом, можно по каждой спектральной линии определять лучевую скорость с точностью до нескольких метров в секунду [14]. Применение интерферометров позволяет решить проблему ширины щели дифракционных спектрографов, а вместо стабилизации всего объема спектрографа (длиной в несколько метров) необходимо термостатировать только интерферометр.

Успешное применение спектрографов с оптоволоконным сочетанием в задаче доплеровского

Рис.12. Небольшой фрагмент интерферограммы, полученной на экспериментальном интерференционно-дифракционном эшелле спектрографе БТА ($R \sim 300\,000$). Линии фраунгофорова спектра пересечены системой дуг, формируемых интерферометром Фабри—Перо.



исследования экзопланет не снижает интереса к варианту столетней давности — передаче света в фокус куда-нибудь посредством системы зеркал. В Европейской южной обсерватории (Чили) завершается создание дифракционного спектрографа фокуса куда-нибудь для поиска планет земного типа [15]. В объеме, занимаемом компонентами спектрографа ESPRESSO, могли бы разместиться все авторы проекта! Схема спектрографа ($R = 59\,000 \div 225\,000$) предполагает применение резателей изображения и сегментирования зрачка, последнее позволяет использовать дифракционную решетку с длиной штриха «всего» 20 см.

Отказ от оптоволоконного сочетания ESPRESSO с телескопами комплекса VLT (Очень большой телескоп, $D = 8$ м) связан, по-видимому, со свойствами многомодовых (ММ) оптических волокон. Астрономы предпочитают ММ-волокна из-за относительно большого диаметра ядра ($50 \div 300$ мкм), потому что в ядро одномодового (ОМ) волокна диаметром несколько микрометров невозможно без потерь «упаковать» изображение звезды, пусть даже средствами адаптивной оптики. Но из-за неточностей сопровождения звезды телескопом и взаимодействия мод (при изгибах волокна) центр тяжести изображения на выходе ММ-волокна (рис.13) смещается на величину, ограничивающую точность измерения лучевой скорости на уровне ~ 1 м/с. ОМ-волокна лишены этого недостатка (причем распределение интенсивности на выходе всегда гауссово),

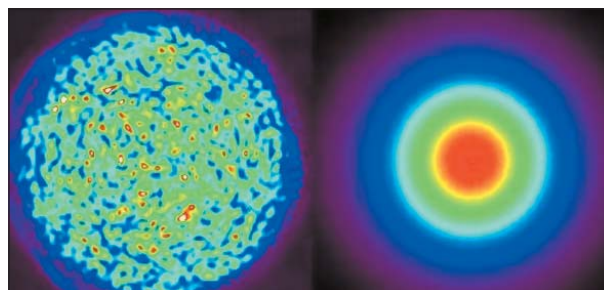


Рис.13. Распределение интенсивности на выходе многомодового (слева) и одномодового оптических волокон.

остается решить задачу экономичного (без потерь света) перехода из ММ-волокна в систему ОМ-волокон.

Задача была решена при создании фотонного фонаря [16] в рамках нового технологического направления — астрофотоники. Если на многомодовый вход фотонного фонаря диаметром около 100 мкм подать собранный телескопом свет от звезды, на выходе получим несколько дифракционно ограниченных одномодовых пучков, которые можно направить в мини-спектрографы высокого разрешения. В таких приборах можно использовать как миниатюрные голографические решетки с объемным фазированием, так и другие средства снижения потерь света (высокоэффективные оптические покрытия и приемники, оптимальные для каждого диапазона длин волн). Разрабатываемый для Экстремально большого телескопа (ELT) опытный образец спектрографа высокого разрешения ($R = 50\,000$) с одномодовым оптоволоконным входом имеет диаметр коллимированного пучка 22 мм [17], что

на порядок меньше пучка в эшелюном спектрографе БТА ($\delta = 240$ мм, [9]). Итак, проблема ширины щели, существовавшая для спектрографов больших телескопов около 100 лет, решается средствами астрофотоники.

Методы астрофотоники позволяют принципиально изменить средства спектроскопии видимого и инфракрасного диапазонов на космических аппаратах, габариты последних будут определяться только оптикой телескопа и служебными системами. В создании новых спектрографов наземного и космического базирования безусловно сыграт роль и технология дифракционных оптических элементов, см. [18].

Первые свои вычислительные алгоритмы авторы отработывали еще на ламповых ЭВМ, где оперативная память в 1 кб занимала целый зал, сегодня такой объем памяти неразличим и в микроскоп. Возможно, что и в спектроскопии высокого разрешения произойдет подобная эволюция, но мы прочтем об этом, к сожалению, в зарубежных журналах. ■

Литература

1. *Wollaston W.H.* A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic reflection // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1802. V.92. P.365–380.
2. *Fraunhofer J.* Determination of the refractive and dispersive indices for differing types of glass in relation to the perfection of achromatic telescopes // *Denkschriften der Bayerischen Akademie der Wissenschaften*. 1817. V.5. P.193–226.
3. *Donati G.B.* Intorno alle strie degli spettri stellari // *Il Nuovo Cimento*. 1862. V.15. P.292–304.
4. *Pickering E.C.* Preparation and discussion of the Draper Catalogue // *Annals of the Astron. Obs. of Harvard College*. V.XXVI. Part I. Cambridge, 1891.
5. *Huggins W., Miller W.A.* On the spectra of some of the fixed stars // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1864. V.154. P.413–435.
6. *Dunham T.Jr.* Methods in stellar spectroscopy // *Vistas in Astronomy*. 1956. V.2. P.1223–1283.
7. *McLaughlin D.B.* // The present and future of the telescope of moderate size: Symposium papers presented at the dedication of the Flower and Cook Observatory of the University of Pennsylvania, June 11–12, 1956.
8. *Panchuk V.E., Chubntonov G.A., Naidenov I.D.* Main stellar spectrograph of the 6-meter telescope. Analysis, reconstruction, and operation // *Astrophys. Bulletin*. 2014. V.69. P.339–355.
9. *Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Юшкин М.В., Найденов И.Д.* Спектрограф высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА // *Оптический журнал*. 2009. Т.76. №2. С.42–55.
10. *Копылов И.М., Стешиенко Н.В.* Звездный спектрограф с эшелле // *Известия Крымской астрофизич. обсерв.* 1965. Т.33. С.308–314.
11. *Герасимов Ф.М.* Современные дифракционные решетки // *Оптико-механическая промышленность*. 1965. Вып.10. С.33–49.
12. *Panchuk V.E., Yusbkin M.V., Yakopov M.V.* High-resolution fiber-fed spectrographs // *Astrophysical Bulletin*. 2011. V.66. №3. P.355–370.
13. *Jackuinot P.* The luminosity of spectrometers with prisms, gratings, or Fabry–Perot etalons // *Journ. Opt. Soc. of America*. 1954. V.44. P.761–765.
14. *Ge J.* Fixed delay interferometry for doppler extrasolar planet detection // *Astrophys. Journ.* 2002. V.571. P.L165–L168.
15. *Mégevand D., Zerbi F.M., Di Marcantonio P. et al.* ESPRESSO an exo-Earths hunter for the VLT // *Proc. of SPIE*. 2013. V.8864. P.88640E-1.
16. *Leon-Saval S.G., Birks T.A., Bland-Hawthorn J., Englund M.* Multimode fiber devices with single-mode performance // *Optics Letters*. 2005. V.30. P.2545–2547.
17. *Ghasempour A., Kelly J., Muterspaugh M.W., Williamson M.H.* A single mode echelle spectrograph: eliminating modal variation, enabling higher precision Doppler study // *Proc. of SPIE*. 2012. V.8450. P.845045 (1–8).
18. *Полещук А.* Оптика века информационных технологий // *Наука в России*. 2013. №2 (194). С.4–10.

Археология и история: хронологическо-методологический диссонанс родственных наук

Е.Н.Черных

Хронологическая шкала, официально утвержденная Международной комиссией по стратиграфии (International Commission on Stratigraphy), выделяет в общем развитии Земли протяженностью примерно 4,5 млрд лет предельно малый финальный отрезок. Он именуется *четвертичным периодом*, длительность его всего 2,588 млн лет. Этот отрезок нередко называют *антропогеном*, поскольку именно в его рамках зарождался и формировался биологический вид *Номо*. Сам период делится, как известно, на два неравнозначных субпериода: длительный, миллионелетний *ледниковый*, он же *плейстоцен*, и весьма короткий по хронологической протяженности *постледниковый*, или *голоцен*, в котором человечество обитает и поныне. На голоцен отводят всего 11 700 лет из общей хронологической протяженности четвертичного периода*. С позиции археологической науки плейстоцен связан с различными этапами развития культур эпохи палеолита, в то время как постпалеолитические общности укладываются целиком в постледниковый субпериод. Все эти лапидарные напоминания о хрестоматийных и, пожалуй, теперь уже не только профессионалам известных истинах помещены в начало статьи для того, чтобы лишний раз подчеркнуть разительную неравнозначность и резкий контраст двух родственных наук — истории и археологии. Кажущийся феноменальным диссонанс обусловлен как

* Для целей данного изложения разумнее, кажется, оперировать не столь точными показателями возраста, а округлить их до ≈ 2,6 млн лет для всего антропогена и ≈ 12 тыс. лет для голоцена.



Евгений Николаевич Черных, доктор исторических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заведующий лабораторией естественно-научных методов Института археологии РАН. Область научных интересов — история технологий и структура древних культур и общностей Евразии.

Ключевые слова: история, археология, методы, хронология.
Key words: history, archeology, methods, chronology.

хронологическими «разрывами», так и концептуальными методологическими подходами каждой из дисциплин к изучению основного объекта своих изысканий — человека и его сообществ в динамике их развития.

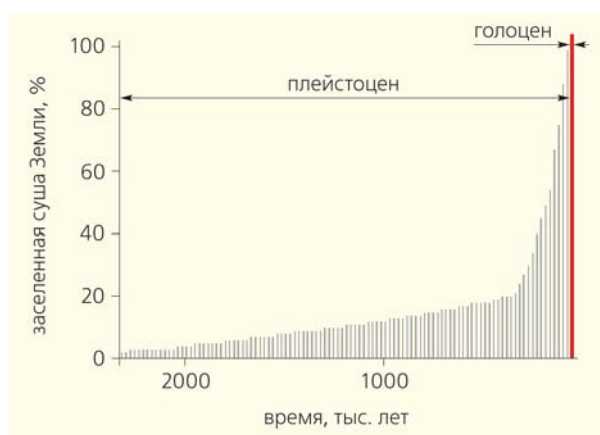


Схема соотношения периодов плейстоцена и голоцена.

Письменные источники в исторической науке

В истории *антропогена* и заключена вся Всемирная история человечества (ВМИ). Две основные научные дисциплины «отвечают» за детальное исследование ВМИ: археология и собственно история. Однако различия хронологического-пространственного полигонов каждой из этих наук/дисциплин невообразимо велики. Речь об этом, а также о методологии пойдет далее. В исследованиях различных аспектов и деталей ВМИ принимают разное участие и другие науки — антропология (палеоантропология), лингвистика, этнология и др. Однако все они должны непременно выступать в тесной сопряженности либо с археологией, либо с историей, поскольку именно в ведении этих наук находятся реальные возможности изучения различных этапов развития человечества.

Для исторической науки/дисциплины письменные источники служат основным и едва ли не единственным полигоном исследования социокультурных аспектов и политических структур человеческих сообществ. Материалы полигона жестко лимитируют как хронологические, так и пространственные рамки этой науки. По мнению большинства специалистов, древнейшие в Старом Свете и, стало быть, на всей Земле письменные документы, обнаруженные в Египте и несколько позднее в Месопотамии, датируются примерно 3000-м годом до н.э. (с различными отклонениями от круглой даты). Однако в пространственном отношении эти регионы чрезвычайно ограничены, а сведения, которые можно получить из клинописных либо иных источников, крайне скупы. Сменялись эпохи, и шаг за шагом ширились те ареалы, о которых можно было извлечь сведения из источ-

ников письменных. Однако лишь после условно-знакового 1500 г. н.э., т.е. с эпохи *Великих географических открытий* (а точнее — эпохи *европейской колонизации планеты*), письменные источники с весьма различной мерой детализации охватывают или хотя бы отчасти касаются всех пространств обитаемой суши Земли.

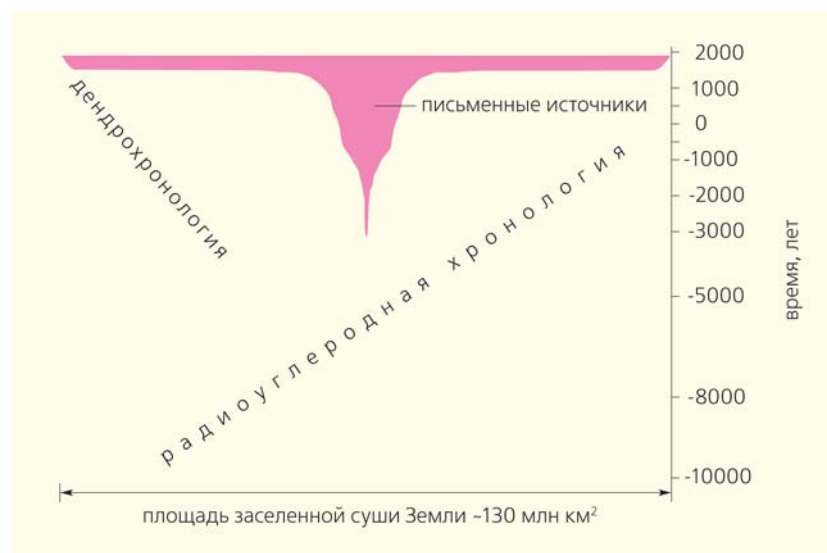
Здесь можно сформулировать одно из самых примечательных отличий между собственно историей и археологией. Для исторической науки/дисциплины лимит отсутствия письменных источников фактически неодолим, без них она по сути становится методически беспомощной. Археологические исследования лимитов подобного рода не признают и не имеют. Люди, начиная с древнейших видов *Homo habilis* или *Homo ergaster* и вплоть до нынешнего дня, непременно и повсюду оставляют материальные следы своего бытия.

Из этого следует, что с позиции *пространственно-хронологического охвата* историческая наука в состоянии составить представление о характере человеческих сообществ нашей планеты лишь для позднейшего из этапов их развития. При этом даже в голоцене ее потенциальный охват не в состоянии превысить 7–8% культур, населявших в этот краткий период всю обитаемую сушу Земли. Если же переместить эти показатели из голоцена в общую картину антропогена, то доля прямых возможностей исторической науки падает до поистине микроскопических величин — не более 0.02%!

Следовательно, историческая наука обеспечивает лишь финальное «покрытие» ВМИ, которое в реальности выглядит тончайшей «пленкой». Все остальные — дописьменные — общества будут на 99.9...% принадлежать исключительно сфере возможностей науки археологической. И диссонанс между этими дисциплинами будет обусловлен не

только фантастическим различием в хронологическо-пространственных характеристиках основных исследовательских полигонов, но и кардинальными отличиями в методологии обеих наук.

Есть еще одно важное обстоятельство. Древнейшие стадии письменной (или же «исторической») эпохи ВМИ в последние десятилетия фактически не обогащаются сколько-нибудь заметными открытиями новых документов, способных ощутимо изменить устоявшиеся представления, например, о социальных организмах планеты, датированных хотя бы периодом *до новой эры*. Практически все они описаны, прокомментированы, неоднократно истолкованы в неисчислимом множестве публикаций. С другой стороны,



Приблизительно выраженное хронологическо-пространственное соотношение между письменными и дописьменными культурами в голоцене.

все накопления невообразимой массы письменной документации нынешнего времени для исторической науки связаны уже с позднейшими этапами человеческой истории, отчего эта наука приобретает все более определенный облик и характер *политологии*.

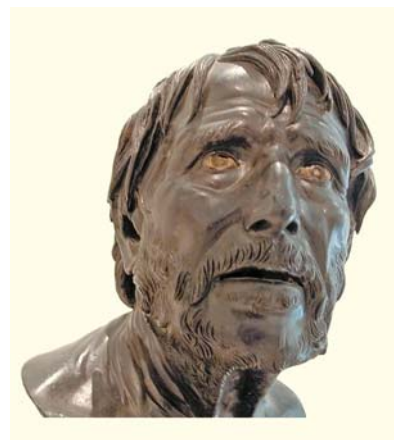
Совершенно иная картина в археологии. Здесь трудно указать на какой-либо год без открытия новых (а порой и принципиально новых) материальных источников — благодаря регулярным раскопкам в разных областях планеты, а также расширению арсенала естественнонаучных методов исследований добытых материалов. Все это требует постоянного внимания и нередко существенных коррективов в трактовке кардинальных, узловых деталей на общем полотно дописанной истории человечества.

Базовые принципы периодизации в археологии

Дешифровка характера человека и социальных образований дописанной эры уже задолго до формирования археологии как науки строилась прежде всего на представлениях о господствовавших в давно исчезнувшем мире технологиях, а также на некоторых базовых концепциях наук естественного цикла — геологии, биологии и некоторых других. Так, древнегреческий поэт и мыслитель Гесиод, живший примерно в 700 г. до н.э., в своем наиболее известном произведении «Работы и дни» различал в истории человечества пять последовательных веков. Изначальным был *век золота*. За ним следовал *век серебряный*, казавшийся уже не столь привлекательным. Третьим оказался совсем нелегкий *век меди* с его людьми, что *были могучи и страшны*. И наконец, после четвертого (правда, никак не сопряженного с технологической канвой), *века славных героев*, человечество ожидал тяжкий мрак пятого — *железного века*. В его кошмар был погружен и сам Гесиод, хотя и сожалел, что не пришлось *раньше его умереть или позже родиться*. Примечательно, что практически все опорные технологические характеристики эпох у автора были густо окрашены оценками нравственного характера [1].

Но вот живший в Древнем Риме много позже — в 1 в. до н.э. — поэт и философ Тит Лукреций Кар в произведении «О природе вещей» (*De rerum natura*) представлял древнейшую историю человечества сквозь призму трех узловых эпох исключительно технологического характера — *камня, меди и железа*. И его периодизация была уже совершенно свободна от этических оценок [2]. После Лукреция минули долгие 19 столетий, и лишь в 1825 г. датский антиквар и организатор музея в Копенгагене Христиан Томсен рискнул расположить в своей экспозиции известные в Европе и доступные ему археологические материалы в порядке, соответствующем схеме Лукреция, только век меди он предпочел именовать *бронзовым* [3]. С тех пор историко-технологическая *триада веков* Томсена — *камень, бронза, железо* — прочно закрепилась в археологической науке, при том что понимание и сущность намеченных эпох нередко претерпевали весьма заметные трансформации или же трактовались неоднозначно.

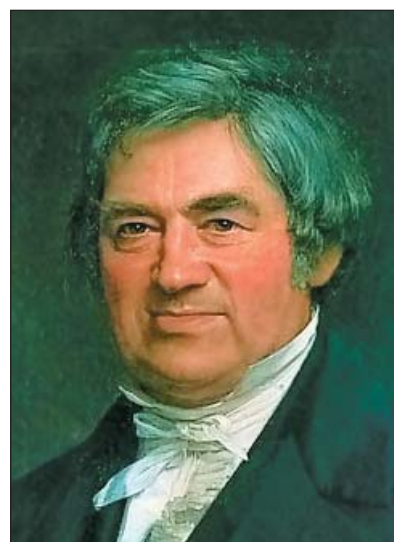
Технологический акцент в дешифровке характера и динамики развития человечества продолжал доминировать, и уже в конце того же XIX в. великий французский химик Марселен Бертло предложил начинать эпоху металлов не с бронзового, а с *медного века* [4]. Свое мнение он обосновывал химическим составом древнего, изученного им цветного металла переднеазиатских изделий: среди них нередко встречались и чисто медные, т.е. без приплава олова. Бертло полагал, что получать медь такого состава проще, нежели искусственные сплавы этих металлов. И поскольку технология выплавки бронзы ка-



Гесиод
(вероятное изображение).



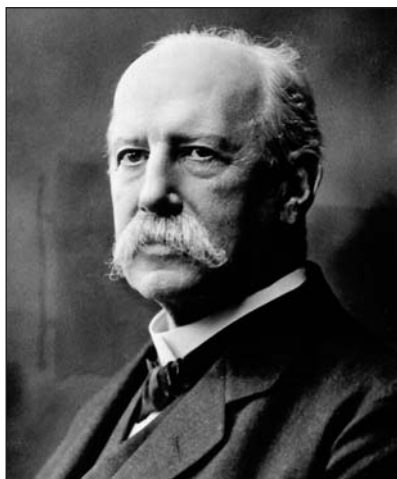
Тит Лукреций Кар
(вероятное изображение).



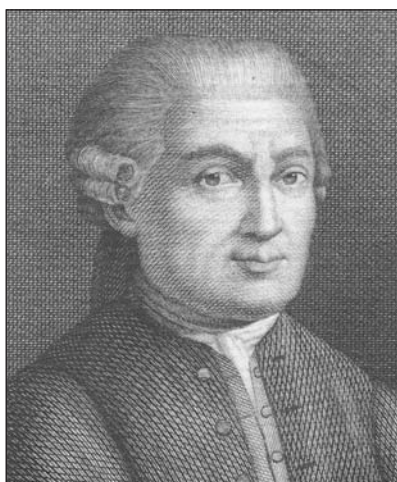
Христиан Юргенсен Томсен
(1788–1865).



Марселен Бертло
(1827–1907).



Оскар Монтелиус
(1843–1921).



Джованни Ардуино
(1715–1795).

залась заметно более сложной, нежели «чисто медная», здесь, по мнению ученого, и коренился показавшийся ему очевидным — и даже бесспорным — аргумент всякого развития от простого к сложному.

От простого к сложному — важнейший принцип развития

В динамике взглядов на дописьменную историю человечества, нацеленных на выявление поступательного хода *от простого к сложному*, нетрудно уловить любопытную преемственность. Так, от античной науки к европейским мыслителям времени *Постренессанса* должен был свершиться впечатляющий «прыжок» через долгий, едва ли не двухтысячелетний «хиатус» с безоговорочным господством в нем канонов христианского понимания мира. Именно в 19-м столетии в ученом мире Европы набирала силу теория эволюции — *от простого к сложному* — наиболее ярким представителем которой стал, безусловно, Чарлз Дарвин (1809–1882). Прямое и понятное воздействие его теории оказала прежде всего на палеоантропологию, на понимание основных этапов в развитии видов *Ното*. Однако импульсы этих взглядов весьма существенно отразились также на археологии, на методах относительной возрастной оценки рядовых археологических материалов.

Пожалуй, с фигурой шведского археолога Оскара Монтелиуса можно связывать заметные трансформации взглядов европейских ученых на археологические древности и установление порядка их относительного возраста [5]. Ученый выстраивал морфолого-типологические ряды изделий, начиная с каменных, простейших по форме; за каменными следовали относительно простые по виду металлические артефакты, ряды которых венчались наиболее усложненными по облику бронзовыми орудиями. Таким образом, предлагался основной принцип определения относительного или релятивного возраста намеченных исследователем типов изделий. В археологии метод Монтелиуса имел большой и очевидный успех; да и поныне не столь уж редко некоторые исследователи предпочитают на базе морфолого-типологических различий артефактов обосновывать их релятивный возраст.

Стратиграфия отложений и релятивная хронология

Однако несравненно более существенными для обогащения археологического арсенала исследовательских методов стали заимствования некоторых кардинальных аксиом из геологии. Прежде всего речь идет об относительной хронологической позиции некоего комплекса артефактов в согласии с его стратиграфическим положением в том или ином памятнике: *чем выше, тем моложе, и чем ниже, тем древнее*. Кажется, впервые наблюдения за стратиграфией стали основой для построения релятивной хронологико-геологической шкалы в работах «отца итальянской геологии» Джованни Ардуино. Во время своих наблюдений в окрестностях г. Виченцы (область Венето, Южные Альпы) он пришел к заключению, что в залегании пластов геологических отложений можно различить четыре последовательные эпохи в формировании этого участка Альп: первичный, вторичный, третичный и вулканический, или же четвертичный*.

* Все это было изложено геологом в письме от 30 марта 1759 г. профессору Антонио Валлисниери [6]. Однако род основных занятий и роль Валлисниери в открытиях Ардуино остаются для нас неясными. Любопытно при этом, что с точки зрения стратиграфии Альпы представляют собой не самый впечатляющий и трудный для дешифровки образец в сравнении, например, с Гранд-Каньоном в Америке.

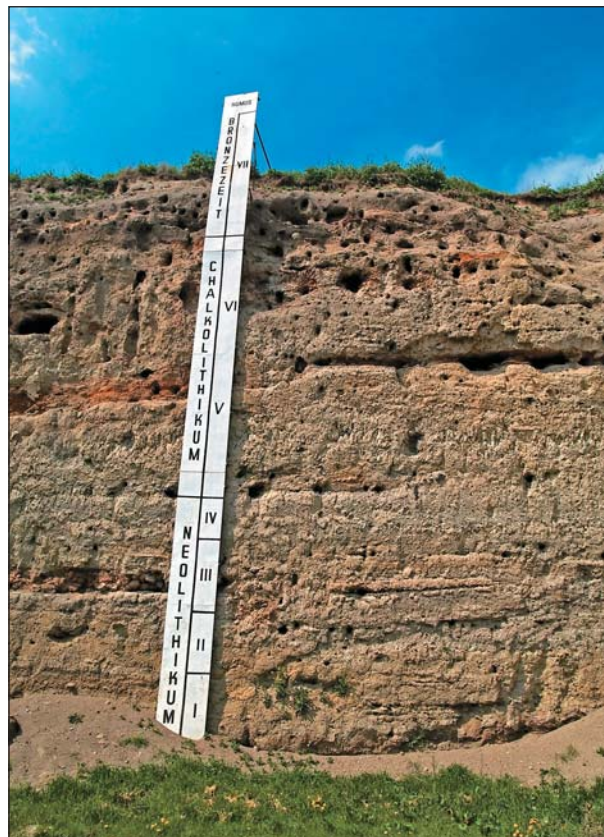
Для общеисторической картины планеты наиболее существенным оказалось, конечно же, стратиграфическое определение позднейшего — *четвертого* — периода в истории Альп, отчего и вся финальная эпоха развития нашей планеты получила титул *четвертичной*. Во всяком случае, только после этих принципиальных инноваций в методологии геологической науки стало возможным (хотя и далеко не сразу) получить в руки археологии весьма надежный метод определения относительного возраста комплексов на базе их стратиграфического соотношения в культурных отложениях конкретного памятника. Вслед за геологией метод распределения слоев по их относительному возрасту (*чем ниже, тем древнее*) получил признание и в археологической методологии, став одним из наиболее важ-



Чертеж и описание напластований в Альпах, сделанные Д.Ардуино.



Гранд-Каньон на плато Колорадо в штате Аризона (США). Последовательность чередующихся напластований здесь выражена предельно четко.



Профиль раскопанной части холма Караново (исследования 1950-х годов) с обозначением различных хронологических горизонтов культурных напластований.

ных приемов при обработке и трактовке культурных напластований. В любом случае этот метод определения относительного возраста древностей оказался для исследователей существенно более надежным в сравнении с приемом, когда основой релятивной хронологии признавали принцип развития *от простого к сложному*.

Системы датировок в археологии

Более логичное и связанное описание методологических различий и взаимодействий между исторической и археологической науками заставляет забежать немного вперед и остановиться на краткой характеристике двух основных, базовых систем датировок в дописьменной истории человечества: относительной (релятивной) и абсолютной (календарной).

Относительная система в своем выражении может быть достаточно простой: к примеру, *культура А древнее культуры В* или же *каменный век был раньше века бронзы*. В этом варианте отсутствует указание на число лет, отличающих сопоставляемые культуры. Другой вариант релятивной хронологии предусматривает обозначение различий с указанием числа лет, пусть даже приближенное: *сосуд А старше сосуда В на 300 лет (примерно)*. Об этой системе как раз и говорилось в предшествующих разделах статьи.

Абсолютная система подразумевает обязательный временной ориентир с указанием на определенную хронологическую шкалу и положение на ней того или иного события. Здесь также возможны два варианта. В первом из них может следовать указание на не употребляемую ныне хронологическую шкалу ушедших в прошлое отсчетов времени типа календарей римского или древних майя. Второй вариант абсолютной системы обычно именуется уже «календарным». Он ориентирован на современный и принятый подавляющим большинством современных сообществ, т.е. на григорианский календарь, когда указывается конкретная датировка того или иного события или артефакта. Этой системы мы коснемся в основном в последних разделах статьи, но сначала обратим внимание на соотношение между обеими системами в археологической науке.

«Провал» между релятивными и абсолютными датировками

Методы относительной хронологии, пожалуй, могли лишь обострить впечатление об отсутствии у археологии реальных возможностей формирования уже не относительных, но календарных хронологических шкал. Вот, к примеру, скорбные мысли по этому поводу видного датского антиквара Расмуса Ньерупа (1759–1829), трудившегося в этой

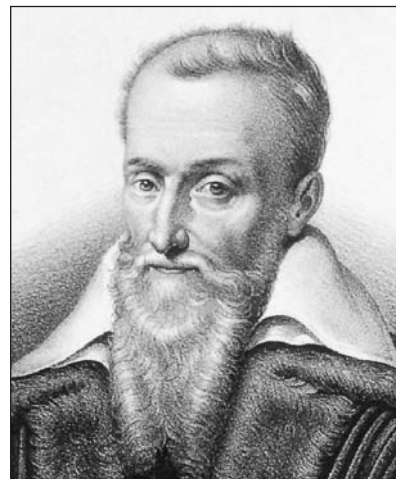
стране фактически одновременно с Томсеном: *Все, что пришло к нам из прошлого, окутано непроницаемым туманом, и его точное время установить невозможно. Мы знаем, что оно раньше эры христианства, но на сколько лет или веков, а может быть, даже более тысячелетия — об этом мы в состоянии лишь гадать* [7]. Следовательно, археология уже целиком зависела от хронологических построений, используемых в исторической науке, ведь разработанные и принятые в ней шкалы могли бы стать своеобразной «печкой», отталкиваясь от которой можно было, пусть хотя бы отчасти, прояснить истинное положение во времени некоторых базовых археологических комплексов.

Каждая культура или же блок родственных культур начинает отсчет лет с события, почитаемого для нее наиважнейшим. Сторонние наблюдатели очень часто указывают на мифологический характер такого события, однако подвергать сомнению высшую реальность самого факта для конкретной культуры всегда считается в ней кощунством. Так, христианский мир ведет отсчет от предполагаемого времени Рождества Христова, произошедшего 2017 лет назад. Для исламских сообществ главным событием было бегство пророка Мухаммеда из Мекки в Медину (15 июня 622 г.), после чего и началось победное шествие ислама по миру. Отсюда сегодня — 1438 год хиджры. Для правоверных иудеев — это сотворение мира, которое, по их поверьям, имело место 6 октября 3761 г. до н.э., или 5778 лет назад. Однако согласно православной христианской версии, это событие произошло раньше — 7525 лет назад, или в 5508 г. до н.э. От этой воображаемой точки отсчитывалось время и в нашей стране до 1700 г., когда Петр Великий распорядился привести российский календарь в соответствие с западноевропейским, причем с юлианским, а не с господствующим там григорианским. Древние римляне кардинальным мировым событием почитали, естественно, основание своего Вечного города, и от него (в большинстве случаев это 753 г. до н.э.) они в своих хрониках и отмечали все годы. Намного позднее, в конце XVIII в., французы попытались возвести новый календарь ко дню провозглашения Республики — 22 сентября 1792 г. Сами годы революционеры-якобинцы обозначали как I, II... VIII, да и названия месяцев звучали как «перриаль», «термидор»... «брюмер». Однако после 31 декабря 1805 г. Франция вернулась к современному григорианскому календарю, который был установлен римским папой Григорием XIII в 1582 году*.

* Если же на краткий момент отвлечься от прошлых «исканий» в замерах времени, то примечательно, что даже в нашем — уже XXI — веке «великий Туркменбаши», бывший секретарь ЦК КП Туркмении Сапармурат Ниязов кое в чем переименовал туркменский календарь. Он повелел именовать январь месяцем туркменбаши — т.е. в собственную честь, а апрель назвать гурбан-солтан-эдже — во славу и почитание своей матери.

Чтобы сопоставить между собой множество хронологических шкал, потребовалось немало времени и усилий многих специалистов, ведь попытки синхронизации различных систем предпринимались еще в I-м тысячелетии до н.э. Все эти причудливо переплетающиеся между собой шкалы пестрят невосполнимыми пробелами. «Расплетают» их с громадными усилиями, да и после этого они могут быть нередко насыщены трудно контролируруемыми ошибками. Вообще же работа по сопоставлению и стыковке различных хронологических письменных систем напоминает сложение полотна гигантского пазла.

Знаковой фигурой в сборке этого сложнейшего «пазла», вне всякого сомнения, стал Жозеф Жюст Скалигер. Этот французский исследователь, гугенот (кальвинист), оставил след своих разнообразных и чрезвычайно плодотворных изысканий не только во Франции, но также в Швейцарии и Нидерландах. Он разработал выдержавшую испытание временем сопряженность календаря древнеримского, введенного в 45 г. до н.э. Гаем Юлием Цезарем, с названным в честь великого римского консула юлианским европейским календарем, а также с календарем григорианским [8]. Ведь Скалигер распутывал эту сложнейшую сеть именно в то время, когда в 1582 г. папа Григорий XIII своей буллой *Inter Gravissimas* ввел во всех католических странах новый отсчет времени. Календарь получил имя римского папы, хотя все инновации в проведенных разработках и принадлежали астроному Христофору Клаввиусу.



Жозеф Жюст Скалигер
(1540–1609).

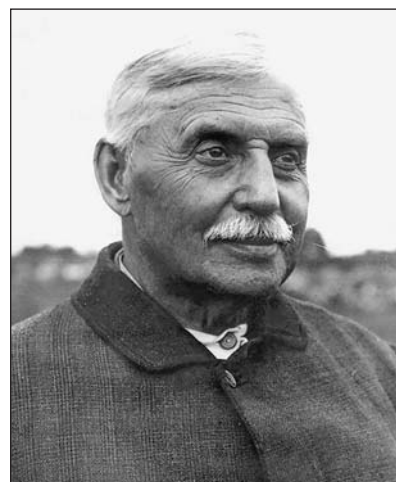


Гордон Чайлд
(1892–1957).

«Свет с Востока» — Ex Oriente Lux

После исследований Скалигера прошло достаточно много времени, но историческая хронология и в позапрошлом веке по-прежнему не могла преодолеть свой вечный барьер полного отсутствия в мире письменных источников, которые помогли бы перекинуть надежный мостик к безбрежному океану археологических древностей. В 19-м и в первой четверти 20-го столетия в европейской археологической науке сформировалось своеобразное направление, получившее наименование *Ex Oriente Lux* («Свет с Востока»). Суть этой броской и афористично звучащей гипотезы заключалась в том, что фактически все важнейшие технологические, интеллектуальные и духовные достижения человечества — это творческий плод культур и цивилизаций, локализованных в области стран «Плодородного полумесяца», т.е., по существу, Месопотамии или Египта, или же — в более широком понимании — Ближнего Востока (как очень часто в Европе понимали, да и понимают донныне Восток). Человечество, обитавшее за пределами «блаженных» стран, было обязано этим изобретениям буквально всем. Способности европейских и северных азиатских «варваров» оценивались лишь по признакам сравнения: сколь удачливы были они в усвоении и воплощении тех идей и достижений, что исходили из «блаженных» краев.

Истоки этой теории буквально тонут в неведомых нам столетиях, и отнюдь не в 19-м, и попытки обнаружить их почти ни к чему не приводили. *Отчасти эта гипотеза основана на антропологической мифологии, корни которой восходят к библейской истории о Вавилонской башне. В том мире донаучных спекуляций было принято считать, что все народы происходят из Азии, которая рассматривалась в качестве их общей прародины, и предполагалось, что все переселения народов следовали за солнцем с востока на запад <...>. Мы теперь знаем, что отношения между Европой и Азией не были столь односторонними, как полагали наши предшественники, и что культурные достижения и народы перемещались в обоих направлениях. Но теория об азиатской колыбели индоевропей-*



Василий Алексеевич Городцов
(1860–1945) [9].

цев основана не только исключительно на предубеждении, — так писал в 1926 г. Вир Гордон Чайлд в книге, где он обсуждал проблему арийцев в связи со степными скотоводами Восточной Европы [10]. Кстати, этот один из самых знаменитых и почитавшийся классиком британский археолог был сторонником данной гипотезы, правда, не в столь безоговорочной форме, как некоторые его западные коллеги. Вот, скажем, Графтон Эллиот Смит считал Древний Египет фактическим источником всех ранних достижений человечества [11]. Да и сам Чайлд в книге об истоках европейской цивилизации именовал, например, Анатолию «царской дорогой», исполнявшей лишь роль проводника благотворных идей и «света истин», что струились из чудесного источника в северо-западном направлении и озаряли Балканы, Центральную и Западную Европу [12].

Эта гипотеза имела своих сторонников не только в среде западноевропейских археологов и историков. Так, знаменитый ученый и, по сути, классик российской археологии Василий Алексеевич Городцов свою приверженность к этой теории выражал предельно жестко: *В Передней Азии, в Месопотамии, гнезился основной генератор идей и технологий. Отсюда различными и дальними дорогами — через Кавказ, Анатолию и Средиземноморье — доходили до диких европейских и азиатских народов все инновации. В Восточную же Европу все новшества проникали через Кавказ и Балканы* <...>. По крайней мере этим лег-

че всего объяснить, что при отсутствии на огромных пространствах северной и средней России каких-либо значительных центров металлургических вещей бронзового времени отличаются довольно значительным развитием <...>. Ведь в лесной зоне России человек был не в состоянии заниматься созданием собственной культуры, хотя в руки его и успели поступить семена высших культур в виде металлургии и скотоводства <...>. Столь же неспособными к развитию самостоятельной культуры оказались и русские степи <...>. С самого начала образования и вплоть до последнего исторического времени степь являлась свидетельницей буйного разгула, поправления прав и всякого бесчиния [13].

Для крайне болезненной темы календарной хронологии в отношении археологических древностей эта гипотеза имела в глазах ее почитателей значение особое. Если что-то задумывалось и производилось изначально на Востоке, то должно быть само собой разумеющимся, что все импорты или подражания за территориальными пределами этого «благословенного» региона следовало датировать более поздним временем. В конкретном выражении, скажем, все медные и бронзовые изделия с обширных пространств Балкан, Кавказа или Восточной Европы могли получать дату лишь позднее 3000 г. до н.э., но никак не ранее. ■

**Окончание
в следующем номере**

Литература

1. Гесиод. Работы и дни. Земледельческая поэма / Пер. В.Вересаева. М., 1927.
2. Лукреций Тит Кар. О природе вещей / Пер. И.Рачинского. М., 1904.
3. Hermansen V. Thomsen Christian Jurgensen (1788–1865) // Dansk Biografisk Lexicon. Kjøbenhavn, 1942. Bind 23. S.550–556.
4. Berthelot M. Introduction à l'étude de la chimie des anciens et du moyen age. Section VIII. Paris, 1889.
5. Montelius O. Die Chronologie der ältesten Bronzezeit in Nord-Deutschland und Skandinavien. Braunschweig, 1900.
6. Arduino G. Sopra varie sue Osservazioni fatte in diverse parti del Territorio di Vicenza, ed altrove, appartenenti alla Teoria Terrestre, ed alla Mineralogia (Lettera al Prof. Antonio Vallisnieri, 30 marzo 1759) // Nuova Raccolta di Opuscoli Scientifici e Filologici. 1760. V.6.
7. Nyerups R. Kjøbenhavns Beskrivelse. Kjøbenhavn, 1800.
8. De emendatione temporum Iosephi Scaligeri Iulii Caesaris f. opus novum absolutum perfectum octo libris distinctum. Cum privilegio Caesareae Majest. Francofurti, 1593.
9. Янин ВЛ., Канторович АР. К 75-летию кафедры археологии исторического факультета МГУ // Исторические исследования. 2015. №3. С.5–45.
10. Чайлд Г. Арийцы. Основатели европейской цивилизации / Пер. с англ. И.А.Емец. М., 2009.
11. Smith G.E. The Ancient Egyptians and the Origin of Civilization. L.; N.Y., 1911.
12. Чайлд Г. У истоков европейской цивилизации / Пер. с англ. М.Б.Свиридовой-Граковой, Н.В.Ширяевой / Под ред. Т.С.Пассек. М., 1952.
13. Городцов В.А. Бытовая археология. Курс лекций, читанных в Московском археологическом институте. М., 1910.

Россыпи радиоактивных песков в эстуарии реки Варзуги (Белое море)

Г.А.Сафьянов,

доктор географических наук

Г.Б.Рязанцев

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

Под действием экзогенных процессов происходит дифференциация наносов по гранулометрическому и минеральному составу. В благоприятных морфодинамических и литодинамических условиях это приводит к возникновению россыпей тяжелых минералов, часто представляющих собой объект промышленных и экономических интересов*. Вместе с тем в некоторых случаях возникают скопления радиоактивных минералов, опасных в условиях рационального природопользования.

Детальные геолого-геоморфологические исследования последних лет привели к открытию на берегах Белого моря россыпей тяжелых минералов с высокой естественной радиоактивностью, существенно превышающей предельно допустимые значения. Особого внимания требуют объекты высококонцентрированной радиоактивности, которые расположены близко к населенным пунктам, т.е. представляющие опасность для здоровья и даже жизни людей.

Задача наших исследований состояла в обнаружении скоплений радиоактивных компонентов в эстуарии р.Варзуги, измерении радиоактивности россыпей, а также в изучении геоморфологических, гидродинамических и литодинамических условий их формирования.

Варзуга, впадающая в Белое море в центре южной части Кольского п-ова, — одна из крупнейших рек этого региона. Площадь ее бассейна составляет 7940 км², величина стока — 3.16 км³/год (по данным 1980–1996 гг.).



Аэрофотоснимок эстуария р.Варзуги со стороны Белого моря.

Фото Н.В.Шевченко

Во время приливов морская вода проникает в русло реки на 7–8 км от устья. При отливах (в основном на правом берегу эстуария) на поверхность выходит осушка. В ее верхней части наблюдается значительное скопление тяжелых минералов с повышенным радиоактивным фоном. Берега эстуария на всем протяжении сложены песками аллювиально-морского происхождения и имеют высоту от 1–1.5 до 10–12 м над уровнем полной воды. В плане наиболее широкая часть эстуария достигает 1 км и располагается в 3.5 км от устья. В устьевой области ширина эстуария сокращается до 100–120 м, что при отливе вызывает резкий рост скорости течения — до 1–1.5 м/сек.

В пределах эстуария по левому борту впадают реки Кица, Кимокша и Костин. С правого борта значительный приток пресных вод отсутствует. Предустьевая часть долины р.Варзуги представляет собой пологонаклонную поверхность с большим числом береговых валов, сложенных песком.

* Сафьянов Г.А. Геоморфология морских берегов. М., 1996.



Концентрация щебня на поверхности террас вследствие эолового переноса песчаных отложений.

Фото Г.А.Сафьянова

Их высота увеличивается с удалением от берега. Группы валов образуют террасовидные поверхности на высотах 2,5–7 и 8–12 м при общей их ширине около 2 км.

Во время действия ветров со стороны моря наблюдается перенос песка на север и северо-восток в сторону села Кузомень. Источниками песка в основном служат пляж и приливная осушка. Вынос материала сопровождается бронированием поверхности остроугольным щебнем красноцветных песчаников терской свиты, залегающих в основании песчаной толщи. Освоение села Кузомень на протяжении не менее 200 лет сопровождалось вырубкой лесов, выпасами скота, возникновением лесных пожаров. В результате граница леса с кон-

ца XIX в. отступила от берега более чем на 3 км. Дефляция (выдувание и развевание ветром частиц рыхлых горных пород), в частности, привела к снижению поверхности кладбища к западу от села, что сопровождалось появлением костных останков предков поселян. По этим данным можно считать, что осредненная скорость дефляции (по вертикали толщи осадков) за последние 100 лет составляла около 1 см в год.

Дома, огороды, а также частичное деревянное покрытие дорог и тротуаров в селе до некоторой степени задерживают движение песков. Однако большая их доля все же попадает в эстуарий, а затем выносится в море. Основное количество наносов, поступающих путем эолового транспорта, отлагается в 1–1,5 км выше села Кузомень по крутому правому борту долины. Внизу на поверхность выходят коренные отложения терской свиты. Верхняя часть борта характеризуется плоской поверхностью и заметным перемещением эоловых форм рельефа в сторону эстуария. Правый борт долины возвышается здесь на 6–8 м над уровнем прилива. Левый борт Варзуги также занят дюнами, но полоса развеваемых песков имеет гораздо меньшую площадь из-за существенно меньшей антропогенной нагрузки. Здесь развиты эрозионно-дефляционные котловины с бронирующим горизонтом щебня песчаника и высокие (до 12 м) дюнные комплексы с ненарушенным травяно-кустарниковым покровом в виде останцов террас. Высота песчаного плато достигает на левобережье 19–21 м, а отдельных вершин дюнных холмов — 23–25 м.

Для индикации пространственного распределения радиоактивных песков в эстуарии Варзуги проводились полевые определения в 10 пунктах

по правому борту и в трех — по левому. Максимальные концентрации радиоактивных песков были установлены на правом берегу. Наиболее крупные их скопления наблюдались в верхней части приливной осушки (приливного пляжа). Ширина полосы темно-серых песков составляла от 1–2 до 4–5 м. Вдоль правого берега эта полоса тянулась практически непрерывно. Гораздо менее выразительны концентрации радиоактивных песков на левобережье.

Правобережье эстуария подвергается размыву в результате совместного действия отливного течения и стока рек Кицы и Варзуги. Так, за время полевых наблюдений в 2007–2008 гг. было установлено, что правый берег эстуария в 2 км от устья отступил на 1,5–2 м. Высота уступа



Разрушение кладбища у села Кузомень в результате эолового выноса песка.

Фото Г.А.Сафьянова

Таблица 1

Интенсивность излучения отложений в эстуарии р. Варзуги

Точка отбора	Образец	Географическое положение точки отбора	Интенсивность излучения, мкР/ч			
			$\gamma\beta_1$	$\gamma\beta_2$	$\gamma\beta_3$	$\gamma\beta_{ср}$
VP-1	VP-1-1	3.3 км к СЗ от устья Варзуги	131	128	137	132
	VP-1-0		143	135	129	136
VP-2	VP-2-1	2.85 км к СЗ от устья Варзуги	434	427	406	422
	VP-2-1	2.8 км к СЗ от устья Варзуги	289	321	2666	292
	VP-2-1	2.67 км к СЗ от устья Варзуги	415	479	437	444
VP-3	VP-3-0	2.1 км к СЗ от устья Варзуги	234	243	219	232
VP-4	VP-4-0	1.46 км к СЗ от устья Варзуги	39	55	47	47
VP-5	VP-5-1	0.86 км к СЗ от устья Варзуги	30	29	32	30
VP-6	VP-6-1	0.36 км к СЗ от устья Варзуги	91	85	88	88
	VP-6-1		79	86	73	79
VP-7	VP-7-1	0.37 км от VP-6 (село Кузомень)	24	23	30	26
	VP-7-1	0.4 км от VP-6 (село Кузомень)	108	139	147	131
VP-8	VP-8-1	1.2 км от точки VP-8	21	30	21	24
VP-9	VP-9-1		120	132	123	125
VP-10	VP-10-1	0.5 км от точки VP-9	135	130	135	133
VP-1	VP-1-1	3.3 км к СЗ от устья Варзуги	90	84	84	86
VP-2	VP-2-1	2.67 км к СЗ от устья Варзуги	381	378	413	391
VL-1	VL-1-1	устье Варзуги, левый берег	47	52	51	50
VL-2	VL-2-1		55	58	73	62
	VL-2-1		58	47	43	49
	VL-2-1		248	264	224	245

Научные сообщения

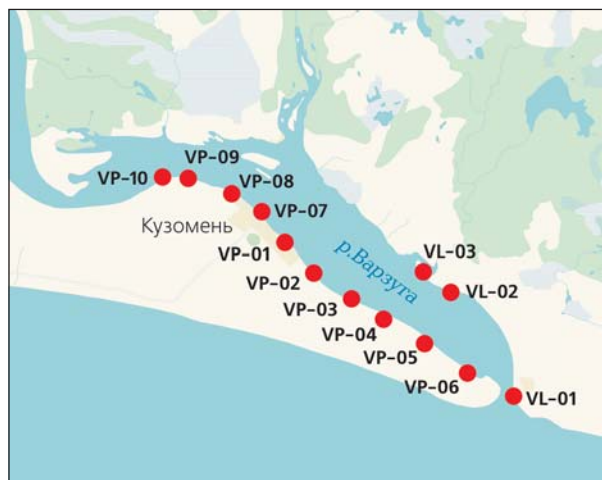
размыва здесь составляла около 1 м. Выше по течению, в районе северного окончания села Кузомень, произошел размыв глинисто-песчаной толщи мощностью до 12–13 м.

Гранулометрический анализ образцов из отложений верхней части приливной осушки показал, что на протяжении 5 км в правобережной части эстуария в составе наносов абсолютно преобладала (от 70 до 100%) фракция мелкого песка (0.1–0.25 мм), а среднего песка (0.25–0.5 мм) составляла от 5 до 30%. Присутствие других фракций в отложениях незначительно.

Геоморфологический анализ космических снимков установил значительное смещение приустьевое участка долины Варзуги вправо от движения потока. Смещение эстуария при этом сопровождалось аккумуляцией наносов в левобережной части и размывом берегов в правобережной.

Многочисленные измерения с помощью счетчика Гейгера установили вариации радиоактивности песков по средним значениям $\gamma\beta$ от 25 до 450 мкР/ч (табл.1). Максимальные величины $\gamma\beta$ -активности фиксируются на расстоянии от 2 до 3.2 км от устья Варзуги. С удалением на 4 км от устья интенсивность излучения снижается до 20 мкР/ч. Однако в 5 км от устья, выше села Кузомень, радиоактивность достигает 130 мкР/ч. Анализ пространственного распределения интенсивности $\gamma\beta$ -активности показал, что она тесно связана с фракцией мелкого песка, который и является основным носителем радиоактивных компонентов.

Минеральный состав «черных песков» с Терского побережья Белого моря приведен в табл.2.

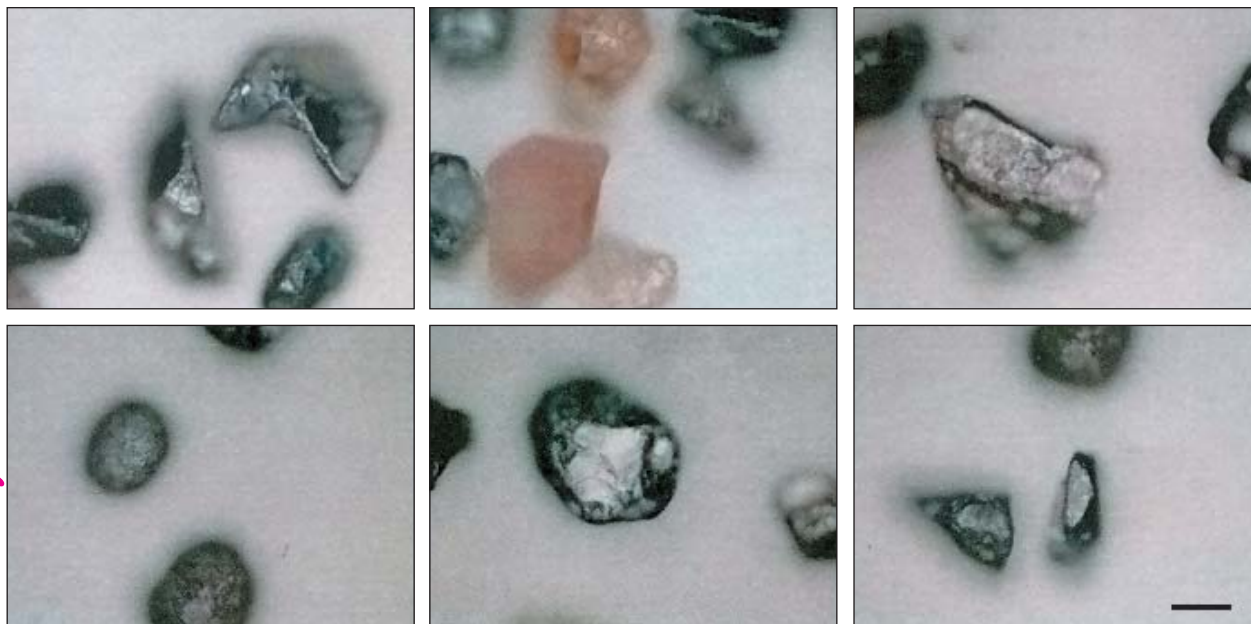


Расположение точек опробования в отложениях осушки эстуария Варзуги.

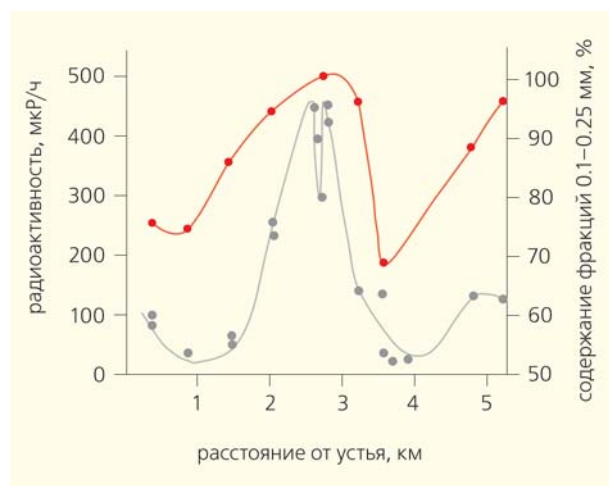
Таблица 2

Минеральный состав пробы «черных песков» в осушке эстуария р. Варзуги

Электромагнитная фракция	Тяжелая немагнитная фракция
рибекит (преобладает)	лопарит (30–40%)
эгирин	анатаз
хлорит	андалузит
ильменит	рутил
гематит	пирос
	циркон



Немагнитная фракция (шлиховой анализ) песков из эстуария Варзуги. Слева направо — лопарит, анатаз, андалузит (вверху) и рутил, пироп, циркон (внизу). Длина масштабной линейки 0.1 мм.



Распределение $\gamma\beta$ -активности песков на осушке эстуария Варзуги (серая кривая) и содержание мелкого песка (красная кривая).

Радиометрические измерения установили наличие основной радиоактивности в тяжелой немагнитной фракции. Главный ее носитель — лопарит $\text{NaCaTi}_2\text{O}_6$, в состав которого входит торий.

Авторы выражают признательность сотрудникам геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова А.Л.Дергачеву, И.М.Лазаренко, Ю.А.Сапожникову, И.Э.Власовой за помощь в аналитической работе, а также заместителю председателя рыбколхоза «Всходы коммунизма» А.Н.Карышеву за помощь в обеспечении полевых и лабораторных работ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №15-05-07590).

Гамма-спектрометрический анализ проводился на спектрометре Canberra (USA) с детектором HPGe-38189 (с Be-окном) и программным обеспечением Genie-2000. Результаты показали высокое содержание тория в пробах песка. В образце VP-2 (см. табл.1) получены следующие удельные активности радионуклидов (Бк/кг): ^{232}Th — 7724.2 ± 15.5 ; ^{238}U — 132.4 ± 0.6 ; ^{137}Cs — 6.2 ± 0.6 ; ^{40}K — 103.5 ± 3.2 .

* * *

Таким образом, итогом проведения полевых и аналитических работ стало открытие на Терском берегу Белого моря естественных радиоактивных россыпей. Уже с получением первых результатов мы сочли необходимым предупредить местное население о возможной опасности отдыха на берегах эстуария р.Варзуги и на некоторых смежных территориях. Кроме того, стало ясно, что нельзя применять местный радиоактивный песок для строительных работ. Продукты распада тория (в частности, торона ^{220}Tn — тяжелого радиоактивного инертного газа) могут нанести тяжелый вред здоровью людей. Возникающие проблемы решить возможно, но для получения позитивных результатов к работе должны быть привлечены профессионалы. ■

А.Ф.Слудский — первый директор Карадагской научной станции

Времена и люди

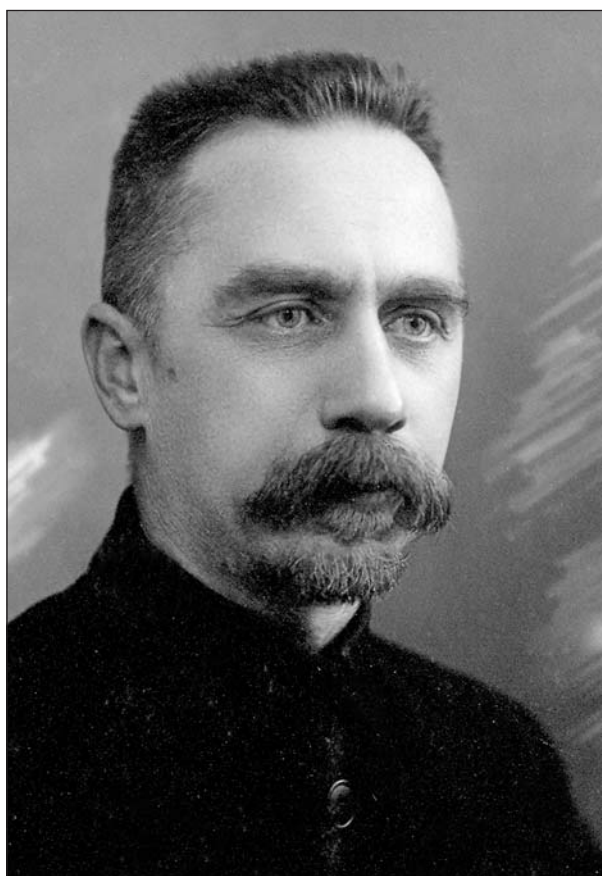
Г.И.Любина,

кандидат исторических наук

Институт истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН
Москва

Александр Федорович Слудский (1884–1954), поработав некоторое время в Крыму, навсегда связал свою судьбу с этим уголком земли. Он — по многим делам своим — настоящий патриот Крыма. «Непревзойденный знаток геологии и природы Крыма», по оценке специалистов, Слудский реализовал свое знание в теоретических работах, в практических действиях по разведке минеральных богатств и использованию данных геологии для инженерно-строительных работ, в разработке строительных материалов, в научно-консультационной деятельности. Талантливый педагог и организатор, он основал свою научную школу, участвовал в создании Карадагской научной станции, Крымского филиала АН СССР и Крымского отдела Русского географического общества [1, с.65].

Карадагская научная станция стала первой страницей крымской биографии Слудского. Он сам рассказал о ее создателе Т.И.Вяземском и его делах [2]. Благодаря энтузиазму знатоков и исследователей Крыма, людей самых разных занятий, уже существует немалая литература о Карадагской научной станции. Из-за недостатка места назову фамилии лишь нескольких авторов: это супруги Ж.К. и Е.И.Владимировы, Н.С.Костенко, Е.А.Слудский* [3–6]. Более чем вековая история станции высветила заслуги первого ее директора в единоборстве с тяжелыми обстоятельствами. Поэтому современные авторы пишут о Слудском с пиететом. Но было время, когда именно его обвиняли в развале станции. О будничной жизни Карадага в 1920-х годах, о трудностях осуществления научных задач, вставших перед небольшим коллективом, о сложных порой отношениях между директором и курирующими организациями, о мотивах перепрофилирования станции и о последствиях



Александр Федорович Слудский.

Архив семьи Слудских

этих действий известно немного. Попробуем воссоздать всю картину на основании документов из фонда Общества имени Х.С.Леденцова в Центральном государственном архиве г. Москвы и из архива Московского общества испытателей природы (МОИП).

По рождению Слудский москвич. Его отец Федор Алексеевич, крупный математик и механик,

* Евгений Александрович Слудский (1910–1991) — старший сын А.Ф.Слудского.



Вид на Карадагскую научную станцию и мыс Меганом [9, табл.2].

был профессором университета. В отроческие годы Александр получил гимназическое образование в Лазаревском институте восточных языков. Затем в 1909 г. с отличием окончил Императорский Московский университет и был оставлен на кафедре геологии для подготовки к профессорскому званию [7, с.123, 124].

Учителем Слудского по университету был известный геолог А.П.Павлов. Под его началом юноша стал ассистентом, затем заведующим геологическим кабинетом, проводил практические занятия по общей геологии, дополнял чтение общего курса лекций по геологии отдельными фрагментами [1, с.65]. Казалось, ему на роду было написано повторить карьеру отца, московского профессора. Но в 1910 г. его жизнь круто переменялась.

Становление Карадагской станции

Своей разнообразной богатой природой Крым издавна привлекал к себе внимание натуралистов и просто обывателей. По мере освоения полуострова на его территории стали появляться дачи, а иногда и целые поселения писателей, артистов, художников. Нечто похожее — приют для отдыха и работы ученых — задумал создать в начале прошлого века доктор медицины, приват-доцент Московского университета, невропатолог и физиолог Терентий Иванович Вяземский.

Он приобрел в 1901 г. близ деревни Отузы Феодосийского уезда Таврической губернии имение

и в 1907 г. начал строить научную станцию у подножия юго-западной части Карадага. Но личных средств Вяземского, его накоплений и повседневных доходов от врачебной практики, не хватило. На помощь пришли профессор физиологии Московского университета Л.З.Мороховец своими сбережениями и землевладелец С.С.Крым, обеспечивший строительству необходимый кредит.

Вяземский и Мороховец вынашивали проект морской биологической станции с физико-химическим оборудованием, чтобы заниматься не только систематикой и морфологией, но и физиологией животных. Собранных денег оказалось мало, особенно когда из-за болезни Мороховец перестал финансировать строительство. Появление на Карадаге в начале 1910-х годов супругов М.В. и А.П.Павловых и приват-доцента Московского университета А.И.Бачинского существенно изменило дело. Именно они подали мысль прибегнуть к материальной поддержке Общества содействия успехам опытных наук и их практических применений имени Х.С.Леденцова при Императорском Московском университете и Императорском Московском техническом училище. Павлов познакомил Вяземского со своим учеником Слудским, подвигнув последнего на изучение геологии Карадага.

В марте 1914 г. Вяземский пожертвовал не вполне еще достроенную станцию Обществу имени Х.С.Леденцова, а 23 сентября того же года скончался, и станция была названа его именем. Александр Федорович, помогавший Вяземскому при жизни, после его смерти стал душеприказчи-

ком по исполнению воли покойного. Он взялся за дело с большим энтузиазмом и энергией. «Если Вам удастся побывать у нас, — обращался он к секретарю Леденцовского общества Н.Ф.Чарновскому, — Вам станет ближе и понятнее мое горячее отношение и беспрдельная любовь к Карадагу» [8, д.66., ч.3, л.163]. Своими рассказами, циклом докладов о станции Александр Федорович привлёк к ней внимание.

Несмотря на сокращение расходов из-за начавшейся Первой мировой войны, станция продолжала обустриваться, приобретать научное оборудование, обживать прилегающую территорию. К началу 1917 г. она имела земельный участок около четырех десятин* [8, д.66., ч.2, л.80].

Наличие дорогостоящей земли и возможные финансовые манипуляции с ней (сдача в аренду, продажа), казалось, должны были обеспечить надежный доход. Отсюда возникла мысль превратить станцию в многодисциплинарный центр исследований, расширив первоначальный замысел Вяземского. Так было заявлено в проекте устава, в котором подчеркивалось, что задачи станции не ограничиваются одной специальностью [8, д.85, л.4]. В окончательной редакции устава станции предписывалось многофункциональное назначение: содействие научным занятиям по различным отраслям естествознания (преимущественно по отделам биологии и геологии), забота о применении их результатов к задачам практики, распространение научных сведений «в пределах указанного цикла наук» [9, с.109].

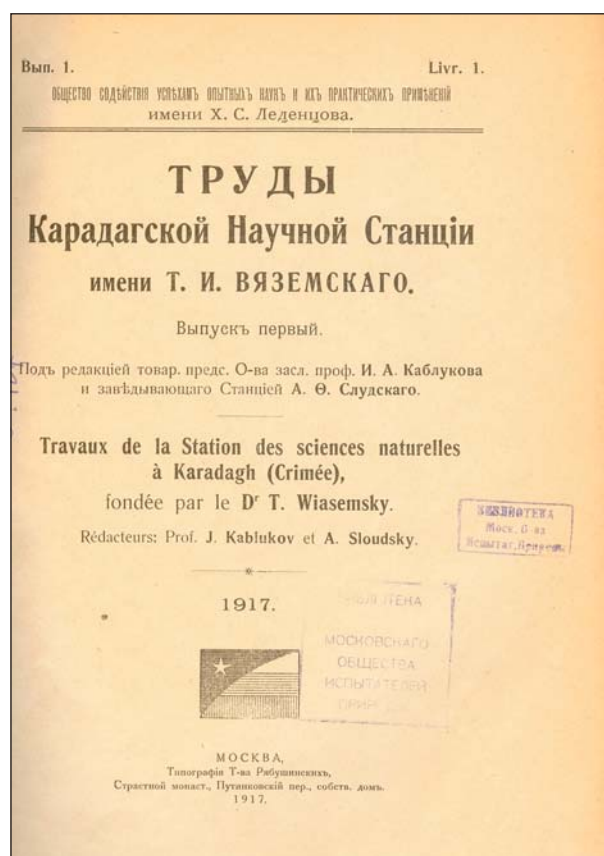
Украшением станции стала библиотека Вяземского, свыше 40 тыс. томов печатных изданий по различным отделам естествознания. В библиотеке хранились сочинения по искусству, шедевры художественной литературы, много старинных и ценных научных книг и журналов, около половины библиотечного фонда составляли издания на иностранных языках.

В 1916 г. Карадагская станция имела четыре лаборатории. Морская располагала рабочими столами, шлюпкой и лодкой с моторами для сбора разнообразного материала. Химическая, геологическая, фотографическая лаборатории были не вполне еще оборудованы. На станции велись сейсмические и метеорологические наблюдения, была частично разобрана и начала работать библиотека [8, д.66, ч.3, л.145—153].

По делам университета Слудскому приходилось надолго отлучаться в Москву, нужен был помощник. В апреле 1915 г. им стал Виктор Николаевич Вучетич, бывший преподаватель женской гимназии. Он составлял флористические, фаунистические и биологические коллекции, сосредоточившись особо на насекомых Карадага. Попутно



Терентий Иванович Вяземский [9, оборот титула].



Титульный лист 1-го выпуска журнала «Труды Карадагской научной станции» (1917).

* Десятина — основная диметрическая русская мера площади. Межевой инструкцией 1753 г. размер казенной десятины был определен в 2400 кв. сажень (1.0925 га).



Вид на Карадаг со стороны Карадагской научной станции имени Т.И.Вяземского. Открытка начала XX в.

Архив семьи Слудских

координировал действия приезжих исследователей и вел хозяйственные дела.

С первых же дней на станции (в основном благодаря усилиям приезжих ученых) развернулись разнообразные работы по геологии, зоологии, ботанике, изучению Черного моря и его берегов. В будущем предполагалось выявить взаимодействие физико-географического и биологического компонентов крымской природы. Работы по изучению морских течений, по акклиматизации лекарственных растений должны были помочь практическим нуждам населения. По поручению общества на Карадаге провели химический анализ пуццолана*. Станция начала издавать «Труды Карадагской научной станции». Первые два выпуска (1917, 1918) под редакцией Слудского, совместно с И.А.Каблуковым (вып.1) и А.П.Павловым (вып.2) пригодились для книгообмена с другими исследовательскими организациями [8, д.85, л.28, 28об.].

Даже в условиях войны развитие станции шло поступательно. Многих исследователей привлекали ее возможности. Принимали всех причастных к работе научных обществ с требованием отчета по окончании пребывания на станции. Рабочие места предоставлялись бесплатно, а за проживание в санитарном корпусе станции посетитель должен был заплатить.

Леденцовское общество создало для руководства станцией попечительскую комиссию из сво-

* Пуццолан (итал. Pozzolana) — пылевидный продукт (смесь вулканического пепла, пемзы и туфа), образовавшийся при извержении вулкана. Применяется в качестве гидравлической добавки к цементам и известковым растворам для эффекта схватывания в водной среде (так называемый гидроцемент), незаменимый скрепляющий компонент при строительстве портовых сооружений.

их членов: А.П.Павлова (ее главы) и преподавателей Московского университета химика И.А.Каблукова и микробиолога и физиолога растений Н.Н.Худякова. Комиссия утверждала бюджетные сметы и распределение расходов, участвовала в разработке и принятии устава и штатного расписания, в приемке пожертвований, в регулировании юридических отношений станции с представителями внешнего мира, контролировала все работы и исследования, ведущиеся на станции, и др.

После событий 1917 г. Леденцовское общество еще работало. Группа московских профессоров (С.А.Федоров, А.П.Павлов, А.М.Настюков, И.А.Каблуков) пыталась отстоять его существование перед Высшим со-

ветом народного хозяйства (ВСНХ) РСФСР, сославшись на заинтересованность Московского университета и Московского технического училища в работе общества и указав на его реальные заслуги перед отечественной наукой. Мнение ученых не было услышано. Декретом ВСНХ от 8 октября 1918 г. имущество и деньги общества были национализированы [10, с.143].

После революции и Гражданской войны

После революции Карадагская станция оказалась на положении островного государства среди обезлюдевшей от голода местности. Она неоднократно подвергалась набегам бандитов — об этом летом 1922 г. сообщал Слудский руководству МОИП. Ему и Вучетичу удалось спасти библиотеку и часть лабораторного оборудования, хозяйственные же постройки были разрушены, а инвентарь станции растащен. Слудский потребовал от руководства МОИП обеспечить материальное положение станции и укомплектовать штат необходимым числом научных сотрудников, в противном случае он угрожал покинуть станцию в течение двух месяцев [11, 1922 г., д.1042, л.2, 1013].

Демарш Слудского возымел действие. 1 июля 1922 г. решением Главнауки** Карадагская станция была передана в ведение МОИП. Как только появились какие-то деньги, начались восстановительные работы.

** Главнаука — государственный орган, координировавший теоретические исследования и пропаганду науки в составе Академического центра Народного комиссариата просвещения (Наркомпроса) РСФСР (1921–1930). После 1930 г. преобразован в сектор науки Наркомпроса РСФСР.

Но только с середины 1925 г., когда государственное финансирование стало постоянным, началось активное восстановление зданий и научного инвентаря. В штате станции в 1924 г. состояли: геолог А.Ф.Слудский, зоолог В.Н.Вучетич, младшие научные сотрудники ботаник В.Н.Сарандинаки и метеоролог Е.Н.Слудская. В сентябре 1924 г. Вучетич переехал в Москву, где вошел в состав комитета по делам Карадагской станции. Его место занял зоолог К.К.Флеров, который проработал на станции недолго [11, 1928 г., д.1160, л.56].

Силами этой немногочисленной группы проводились работы по всестороннему изучению Карадага: его геологии, особенностей и географического распределения местной флоры и фауны; велись постоянные метеорологические наблюдения. Уже с 1926 г. сотрудники станции пытались систематизировать собранный на Карадаге материал. В частности, Сарандинаки составила типовые карточки биологических наблюдений, в которые вносились материалы сотрудников и приезжих ученых.

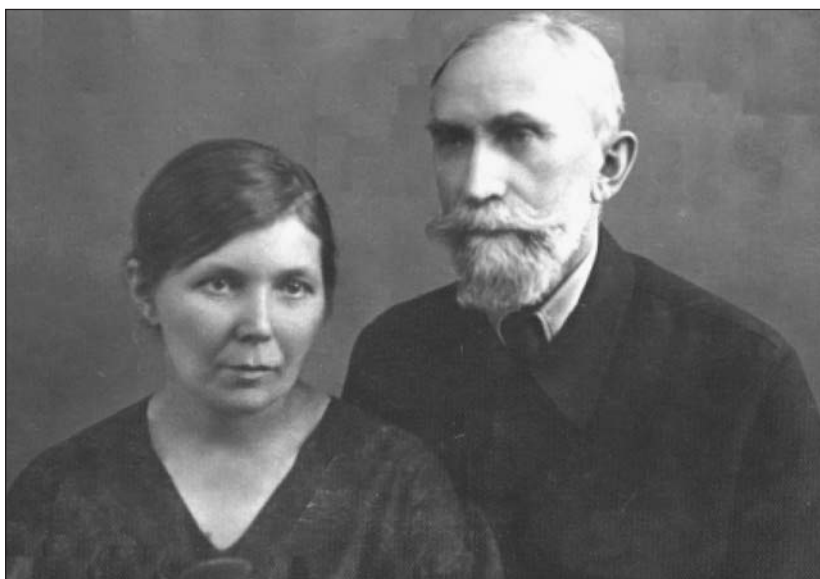
После 1925 г. на станции продолжилась работа со студентами-практикантами по различным отраслям знания. Научные сотрудники ежемесячно в течение сезона (май—сентябрь) руководили работой 24 студентов. Это побудило Слудского обратиться в Главнауку с пожеланием: предусмотреть в штате шесть единиц работников различных специальностей для руководства студентами [11, 1926 г., д.1114, л.14].

Силами сотрудников на Карадаге развернулась культурно-просветительная работа. В 1925 г. здесь побывало 3 тыс. человек; проводились экскурсии, лекции и популярные беседы и с организованными группами из школьников, учителей, профсоюзных работников, рабочих, колхозников, и с отдельными посетителями. Для молодежи устраивались познавательные походы в горы, для местного населения в Отузах проводились общеобразовательные чтения. Сотрудники станции и ее гости помогали местным жителям советами в борьбе с сельскохозяйственными вредителями, эпидемиями малярии, в акклиматизации новых культурных растений, в выращивании виноградных лоз, а также подсказали строителям место для сейсмической станции в Крыму. Постоянную работу по изучению сельскохозяйственных вредителей вел Вучетич.

Первые исследователи вернулись на Карадаг уже в 1922 г. Начиная с 1924 г. академик Ф.Ю.Левинсон-Лессинг с сотрудницей

Геолкома Е.Н.Дьяконовой и топографом А.А.Турцевым изучал петрографию Карадага в области развития вулканических пород, особенно тех, которые вызвали магнитные аномалии на древнем вулкане. Эти же исследователи вместе с горным инженером А.И.Спаскукоцким выясняли возможность промышленной разработки трасса-черноморита как источника пуццолана. Выявлением магнитной аномалии на Карадаге занимались профессор А.В.Вознесенский и сам заведующий станцией. Геолог Д.В.Соколов провел детальную геологическую съемку на Карадаге. На станции побывали многие зоологи, сотрудники АН СССР, Всеукраинской академии наук (ВУАН), 1-го и 2-го МГУ [11, 1924 г., д.107, л.24]. Со временем сложился обычай чтения докладов по результатам исследований гостей Карадага. В 1925 г. докладчиками стали: академик Ф.Ю.Левинсон-Лессинг, профессора С.Л.Иванов и Д.В.Соколов. К 1926 г. станция могла предоставить гостям 20 мест, хотя помещение для морских исследований не было еще полностью восстановлено. В том году только МОИП командировало на Карадаг 30 исследователей, прочие посетители пользовались услугами станции для самостоятельной научной работы [12, с.328].

В докладных записках МОИП Слудский указывал на выгодное геолого-географическое и климатическое положение станции, на большие научные и культурные результаты, которые она может дать. Он был активным пропагандистом природного заповедника на Карадаге — эту идею впервые высказал Павлов в феврале 1922 г. на Всероссийском курортном съезде в Москве. В брошюре 1924 г. Слудский развил мысль, почему именно Карадаг должен стать местом национального парка [13]. Александр Федорович подчеркнул



Виктор Николаевич Вучетич с женой Верой Владимировной. 1930-е годы.

Архив семьи Слудских

поучительность этого объекта для исследователей. Древний горный массив сохранил следы вулканической деятельности и более поздних тектонических процессов, здесь наблюдается довольно редкое явление магнитной аномалии. Карадаг отличается разнообразием форм — на небольшом пространстве сошлись три составляющих природного ландшафта: море, горы, равнина. Береговая линия причудливо изрезана и позволяет изучать действие морских течений. Для посетителей, продолжал Слудский, Карадаг привлекателен чрезвычайной красотой пейзажей, сродни «грандиозным» полотнам художника К.Ф.Богоевского.

Удобство создания заповедника на Карадаге Александр Федорович подкрепил такими практичными аргументами, как: присутствие научной станции — опоры всякой деятельности на этой территории, незаселенность местности, легкость ее ограждения (природная ее защищенность со стороны моря и равнины) [12, с.5]. В июле 1926 г. он выступил с ходатайством перед Главнаукой об объявлении карадагских земель заповедными [11, 1926 г., д.1114, л.1].

Материальные и научные дела станции к началу 1927 г., казалось, были на подъеме. Развернулись крупные строительные и ремонтные работы, станция получила 1000 руб. из золотовалютного фонда на приобретение оптических приборов венской фирмы «Рейхарт» и 23 наименований заграничных журналов. Она поддерживала отношения с 34 учреждениями: АН СССР, ВУАН, Геолкомом, с вузами, ведомственными и административными организациями страны [11, 1927 г., д.1138, л.5, 81]. Но именно тогда начались конфликты Слудского с руководством МОИП, завершившиеся его отставкой.

Конфликт с руководством МОИП

По признанию Слудского, напряженность в отношениях возникла со второй половины 1925 г., когда станция получила центральное (бюджетное) финансирование. Для осуществления контроля со стороны МОИП был создан комитет по делам Карадагской научной станции по образцу дореволюционного. В начале 1926 г. в его состав вошли: вице-президент МОИП А.П.Павлов, ученый секретарь общества В.А.Дейнега, его библиотекарь А.И.Бачинский и члены В.Н.Вучетич и Л.И.Курсанов. Функции комитета были подтверждены в 1927 г. [11, 1926 г., д.1118, л.39; 1927 г., д.1138, л.20б].

Уже в апреле 1926 г. Слудский передал в МОИП заявление об уходе, сославшись на подорванное здоровье и невозможность совмещать научную и административную работу [11, 1926 г., д.1116, л.8]. Руководство МОИП его проигнорировало, но в конце 1926 г. высказало порицание директору, который отправил отчетность по ремонту станции, минуя главу общества. Бумагу подписали близкие Слудскому люди: супруги Павловы, Ба-



Алексей Иосифович Бачинский.

Иконотека членов МОИП

чинский и Вучетич [11, 1926 г. д.1118, л.44]. Сам повод кажется ничтожным. Руководство МОИП через голову директора станции передало некоторую сумму подрядчику для проведения ремонтных работ. Много позже оно потребовало от Слудского отчет о расходовании денег. Задним числом заведующий добыл необходимые документы и отправил их в Главнауку. Дальнейшее продолжение истории уже известно.

Причины разногласий Слудский суммировал в письме от 14 апреля 1927 г. к некоему Дмитрию Владимировичу, пытавшемуся примирить противные стороны. Слудский был недоволен тем, что комитет (законно осуществляя функцию общего руководства) вмешивается в дела оперативного управления и лишает заведующего станцией инициативы, низводя его роль до простого приказчика в таких вопросах, как разработка временного положения о станции, ее исследовательской программы, штатной политики.

Особенно раздражала Слудского кадровая политика МОИП. С 1924 по 1926 г. научные штаты станции не увеличились, работало постоянно всего четыре человека. Но с 1925 г. была введена новая раскладка должностных единиц: один действительный член, один научный сотрудник 1-го и два 2-го разряда. 10 февраля 1926 г. Слудский получил от Главнауки извещение, что его и Сарандинаки утвердили в должности действительных членов, для зоолога осталась только единица 2-го разряда, что, по его мнению, не соответствовало важности проводимых им исследовательских работ. Попытки получить для зоолога дополнительное штатное

место провалились. Слудский считал также недопустимым назначение на должность зоолога 2-го разряда специалиста по сравнительной анатомии (Н.А.Бобринского), тогда как специфика работы требовала присутствия энтомолога и гидробиолога. Он находил, что подобное вмешательство МОИП ставит под сомнение саму будущность организации, созданной годами длительной упорной работы [11, 1928 г., д.116, л.57–59].

После сезона летних работ на станции 1927 г. общество сообщило в Главнауку о неспособности заведующего «поставить ее работу на должную высоту». 18 октября того же года Слудский подал заявление об уходе, мотивируя его тем, что политика МОИП в отношении станции губительна для нее и он отказывается отвечать за ее будущее [11, 1928 г., д.1160, л.52]. В ноябре МОИП приняло решение о его отставке. Временное управление станцией было передано Сарандинаки, а с января 1929 г. на этом посту ее сменил харьковский профессор, гидробиолог В.Л.Паули.

В конце 1927 г. Слудский перешел на службу в Феодосийскую гидрометеорологическую станцию, оставаясь в должности действительного члена Карадагской станции. 9 июня 1928 г. Главнаука отрешила Александра Федоровича от этой должности по его собственной просьбе. Так внешне бесславно закончилась его карьера на Карадаге.

В разъяснении Главнауке по поводу отставки Слудского МОИП сообщало, что он полностью развалил научную работу станции. По оценке общества, не лучше обстояли и хозяйственные дела. Сама станция велика, отмечали авторы записки: 14 строений, общей площадью в 2.459 м², она обладает научными приборами и обширной библиотекой. Многие здания нуждаются в достройке, а некоторые — и в капитальном ремонте, при этом большой участок земли остается практически неосвоенным — не за тем ведь он дан станции, чтобы на нем пасли скот технические работники. Основным же упрек в адрес заведующего состоял в том, что он завел «семейный уклад», делами распорядились он сам, его жена и секретарь (?) [11, 1928 г., д.1160, л.37об.].

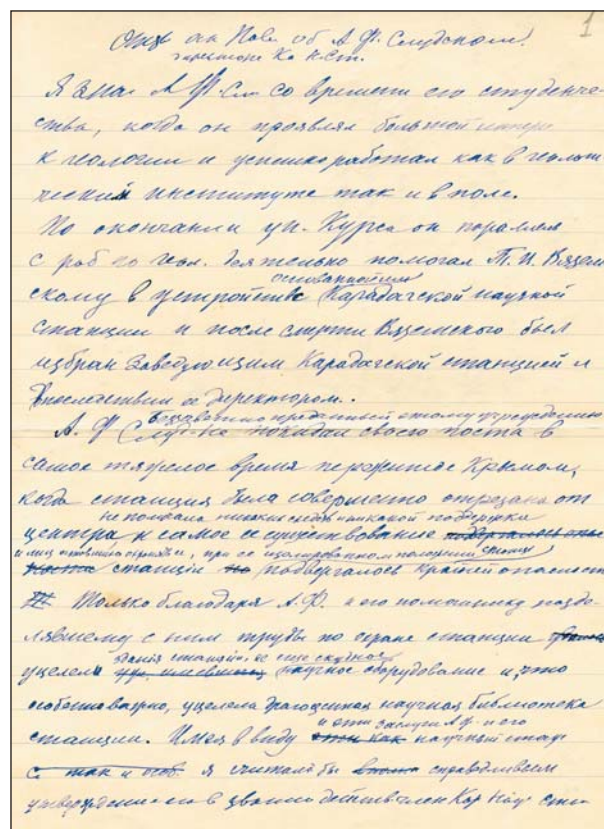
Финал этой истории на первый взгляд кажется необъяснимым. Как могли оказаться в непримиримом противоречии со Слудским его бывшие единомышленники? Только ли независимый, категоричный нрав заведующего станцией тому виной? Почему руководство МОИП не сделало ничего, чтобы удержать в целом успешного (учитывая жесткие условия существования) директора? Почему выдвинуло против него демагогическое обвинение, что он не сумел привести станцию в образцовый порядок? И почему сам Слудский так обреченно отнесся к необходимости покинуть станцию, в создание которой вложил 12 лет тяжелого труда?

Некоторое объяснение этой коллизии можно найти в событиях, последовавших вскоре после



Алексей Петрович Павлов.

Иконотека членов МОИП



Черновик отзыва А.П.Павлова о работе А.Ф.Слудского на посту директора Карадагской научной станции. Без даты, предположительно не ранее 1921 г. (АРАН. Ф.48. Оп.1А. Д.148. Л.1).



Елена Николаевна Слудская, жена А.Ф.Слудского, на побережье бухты Карадагской.
Архив семьи Слудских

отставки Александра Федоровича. Постановлением Комитета по делам Карадагской научной станции 29 января 1928 г. ей было придано значение биологической [11, 1928 г., д.1161, л.8]. ГУС* утвердил это решение 6 апреля 1928 г., подчеркнув, что миссия станции по геологическому обследованию Карадага завершена, топографическая карта составлена, а исследования общей гео-

*ГУС — Государственный ученый совет (1919–1933), руководящий научно-методический орган Наркомпроса РСФСР, который осуществлял политику государства в области науки.

административные обязанности лишали возможности заняться наукой. А главное, перепрофилирование станции представлялось неизбежным. Были причины личного свойства, о которых умалчивали официальные бумаги. В семье Слудских подрастало трое детей, приходилось задумываться об их систематическом образовании. Так сложились в жизни Александра Федоровича многие обстоятельства, выбор был сделан им добровольно, и обжитое место покинуто.

История не окончилась полюбовно, без ущерба для репутации Слудского, потому что основной ход событий определяла в ней Главнаука. Часто она принимала кадровые решения единовластно, без участия совета МОИП и тем более без консультаций с директором станции. Показательно, что объяснительные записки с взаимными обвинениями с обеих сторон были инициированы Главнаукой уже после ухода Слудского.

Да и само МОИП, как и многие другие научные учреждения, в конце 1920-х годов оказалось в затруднительном положении. Начавшаяся «культурная революция» подвергла жесткой проверке все исследовательские, учебные, научно-просветительские организации на предмет их классового состава, соответствия партийным установкам. Уже мало было голословного заявления о приверженности принци-



Здания станции и метеоплощадка. 1920-е годы.

Архив семьи Слудских



Современный вид Карадагской научной станции имени Т.И. Вяземского.

Личный архив Л.В.Знаменской



Современная панорама Карадага и его окрестностей со стороны хребта Эчки-Даг.

Личный архив Р.С.Кветкова



Михаил Александрович Мензбир.

Иконотека членов МОИП

пам марксистской философии, нужно на деле демонстрировать свою близость к задачам хозяйственного строительства. Поворот станции к непосредственным нуждам местного края оставался, возможно, единственным способом спасти ее. На съезде по изучению производительных сил Крыма весной 1928 г. руководство МОИП выступило с предложением согласовать биологическую работу станции и аналогичных научно-исследовательских организаций в Крыму, подчинив ее задачам первой пятилетки.

Но этим дело не закончилось. Местная пресса обвинила руководство МОИП в протекционизме при назначении сотрудников станции. В центральной газете «Правда» 28 ноября 1928 г. (№276, с.4) появилась небольшая заметка о Карадагской научно-биологической станции с многозначительным названием «Черное гнездо». Автор, укрывшийся под литерой «С», изобразил станцию как прибежище антисоветчиков, где бывшая помещица Сарандинаки, экс-граф Бобринский и присланный из Москвы бывший помещик и мировой судья С.Г.Лаврененко (завхоз) начали травлю против Вучетича и Слудского, и те были вынуждены уйти со станции. И все это случилось по недосмотру партийных и советских организаций Феодосийского района, не удосужившихся заглянуть на Карадаг.

Пришлось президенту МОИП М.А.Мензбиру послать в Главнауку, «Правду» и местную газету «Красный Крым» опровержение. Последовало

разъяснение о научных достижениях «помещицы» Сарандинаки и о причинах ухода со станции Вучетича и Слудского. В целом оказалось, что положение дел на Карадаге не так уж плохо, что станция «скорее прогрессирует». Заключение послания президента звучало дипломатично, в духе фразеологии конца 1920-х годов: «Общество вместе с Главнаукой, согласно директивам ГУС, стремится создать центр научной и учебной работы на пользу всего Советского Союза и местного края и рассчитывает на активную поддержку местных партийных и советских работников» [11, 1928 г., д.1159, л.106.]. Этот тонкий маневр и авторитет старейшего в России научного общества спасли станцию от нависшей угрозы. Дело обошлось сменой всего административно-хозяйственного состава, назначенного уже после ухода Слудского. Само МОИП в итоге пристрастной проверки со стороны административных и партийных органов устояло. А его двойник — Общество любителей естествознания, антропологии и этнографии при Московском университете — в конце 1930 г. было слито с МОИП, лишилось помещения, библиотеки, имущества и практически перестало существовать [11, 1933 г., д.1243, л.14].

Во время неоднократных проверок и реорганизации станции в 1928 г. научная работа на ней практически замерла, существенно сократились ассигнования на 1928–1929 гг. Руководство МОИП резонно заметило вышестоящей инстанции, что при таких условиях ее научные работы едва ли поспеют за темпами роста общесоюзной пятилетки, и, следовательно, ставится под сомнение ее роль базы теоретических и прикладных исследований для всей страны. МОИП просило Главнауку увеличить контрольные цифры финансирования с 17.7 до 20.9 тыс. руб. [11, 1929 г., д.1196, л.69].

Но 1 октября 1929 г. станция была передана Крымскому наркомату просвещения и переведена на местный бюджет. Сразу же возникли проблемы с выплатой зарплат младшим научным сотрудникам, с покупкой топлива на зимний сезон, с приобретением иностранной научной литературы и оборудования. Апеллируя к тому, что местная принадлежность лишила станцию центрального руководства, соответствующего ее общегосударственному статусу, МОИП просило вернуть ее в ведение Наркомпроса РСФСР, сохранить за ней центральное финансирование и свое научное руководство [11, 1930 г., д.1194, л.27].

И далее в 1929–1930 гг. МОИП и биостанция пытались вернуть финансирование из центрального бюджета. В марте 1933 г. сектор науки Наркомпроса РСФСР сообщил, что готов вернуть станцию под контроль МОИП, если оно возьмет на себя ее полное содержание [11, 1933 г., д.1240, л.2, 4]. Ни МОИП, ни Президиум АН СССР взять на себя такие обязательства не могли. Территориальная близость к Украине предредила судьбу станции, в 1937 г. она вошла в состав АН УССР.



Современная панорама Карадага со стороны пос.Коктебель.

Личный архив Р.С.Кветкова

* * *

В столетней истории Карадагской станции период руководства Слудского соотносится с героическим временем ее становления наперекор бедствиям революции и двух войн, существенно замедливших строительство. Несмотря на малость подручных сил и средств, Александру Федоровичу удалось завершить замысел Вяземского.

Начальный импульс развития оказался настолько мощным, что сделал последующее существование станции необратимым, уже при Слудском она доказала свою жизнеспособность. Со временем станция превратилась в крупный центр притяжения для отечественных и зарубежных исследователей, как и было задумано с самого начала. ■

Автор благодарит за помощь в работе заместителя директора по научной работе Карадагского природного заповедника, кандидата биологических наук Наталью Спиридоновну Костенко.

Литература

1. Муратов М.В. Александр Федорович Слудский // Бюллетень МОИП. Отд. геол. 1954. Т.29. Вып.5. С.65–68.
2. Слудский А.Ф. Терентий Иванович Вяземский как основатель Карадагской научной станции // Тр. Карадагской научной станции им.Т.И.Вяземского. 1917. Вып.1. С.7–11.
3. Владимиров Е.И., Владимирова Ж.К. История Карадагской научной станции в хронике журнала «Временник» // Культура народов Причерноморья. 1998. №4. С.169–242.
4. Владимиров Е.И., Владимирова Ж.К. Архивные страницы // Карадаг: Сб. научных трудов, посвященных 90-летию Карадагской научной станции и 25-летию Карадагского природного заповедника НАН Украины. Кн.1. Симферополь, 2004. С.11–27.
5. Костенко Н.С. Вековой юбилей Карадагской научной станции им.Т.И.Вяземского // 100 лет Карадагской научной станции им.Т.И.Вяземского: Сб. научных трудов. Симферополь, 2015. С.37.
6. Слудский Е.А. Карадаг. Воспоминания (1917–1926). Симферополь, 2004–2005.
7. Стародубцева И.А. Слудский Александр Федорович // Павловская геологическая школа. М., 2004. С.123–126.
8. Центральный государственный архив г.Москвы. Центр хранения документов до 1917 г. Фонд 224 (Общество Х.С.Леденцова). Оп.1.
9. Слудский А.Ф. Отчет о работе станции за 1916 г. // Труды Карадагской научной станции им.Т.И. Вяземского. Вып.1. 1917. С.104–112.
10. Волков В.А., Куликова М.В. Общество поддержки научных исследований им.Х.С.Леденцова // Вопросы истории. 1997. №9. С.135–143.
11. Архив МОИП (1922–1933 гг.).
12. Ученые общества, состоящие при 1-м Московском университете. М., 1927.
13. Слудский А. О национальном парке на Карадаге. Феодосия, 1924.

О ЛЖЕНАУЧНОСТИ ГОМЕОПАТИИ

Меморандум Комиссии по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований при Президиуме Российской академии наук

Настоящий меморандум Комиссии по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований при Президиуме РАН (далее Комиссия) посвящен гомеопатии. Комиссия заявляет, что лечение сверхмалыми дозами различных веществ, применяемое в гомеопатии, не имеет научных оснований. Этот вывод опирается на тщательный анализ публикаций в научных изданиях, отчетов о клинических исследованиях, их обобщений и систематических обзоров. Комиссия подтверждает, что принципы гомеопатии и теоретические объяснения механизмов ее предполагаемого действия противоречат известным химическим, физическим и биологическим законам, а убедительные экспериментальные подтверждения ее эффективности отсутствуют. Гомеопатические методы диагностики и лечения следует квалифицировать как лженаучные.

Гомеопатия как вид альтернативной медицины существует уже более 200 лет. За это время неоднократно предпринимались попытки подвести под гомеопатию научную базу. Все они оказались в итоге безуспешными:

- многочисленные клинические испытания, проведенные в разных странах в разное время, не смогли экспериментально продемонстрировать эффективность гомеопатических средств и методов лечения;
- многочисленные предложенные теоретические объяснения возможных механизмов действия гомеопатии находятся в противоречии с твердо установленными научными представлениями о структуре материи, устройстве живых организмов и функционировании лекарственных средств;

Рекомендации

Министерству здравоохранения РФ. Пересмотреть в свете актуальных научных данных принятие более 20 лет назад без достаточных оснований решения о внедрении гомеопатии в систему российского здравоохранения. Вывести гомеопатические препараты из медицинского употребления в государственных и муниципальных лечебных учреждениях. Не включать гомеопатию в новые и обновляемые стандарты оказания медицинской помощи, клинические рекомендации (протоколы лечения).

Дополнить требование об обязательной маркировке «Гомеопатический» на вторичной упаковке гомеопатических лекарственных препаратов (п.6 ст.46 Федерального закона «Об обращении лекарственных средств») требованием обязательного явного указания на отсутствие доказанной клинической эффективности и показаний к применению. Обязать производителей включать это указание в инструкцию к препарату и его общую характеристику, а также указывать в инструкции фактический состав гомеопатических средств. Для препаратов с разведением C12 и более, то есть не содержащих действующих веществ, указывать только фактически содер-

— априорно постулированные «принципы гомеопатии» являются по своей природе умозрительными догматическими утверждениями, восходящими к протонаучному этапу развития физиологии и медицины.

Гомеопатия не является безвредной: больные тратят значительные средства на недействующие препараты и пренебрегают средствами лечения с подтвержденной эффективностью. Это может приводить к неблагоприятным исходам, в том числе к смерти пациентов.

Настоящий меморандум констатирует, что в научном сообществе гомеопатия на сегодня рассматривается как лженаука. Ее применение в медицине противоречит основным целям отечественного здравоохранения и должно встречать организованное государственное противодействие. С учетом этого Комиссия сформулировала рекомендации различным лицам и организациям, направленные на исправление сложившейся ситуации, когда неэффективное гомеопатическое лечение занимает значительное место в отечественной системе здравоохранения.

Меморандум основан на экспертном заключении, составленном междисциплинарной рабочей группой по поручению Комиссии. В ее состав вошли специалисты в области доказательной, экспериментальной и клинической медицины, психотерапии, психологии, физики, химии, биохимии, иммунологии, молекулярной биологии, фармакологии, биотехнологии, фармации и биостатистики.

жащиеся в препарате вспомогательные компоненты (вода, лактоза и так далее). Требовать указывать предполагаемое действующее вещество в отдельном перечне «в приготовлении использованы». При любом разведении указывать использованное в приготовлении предполагаемое действующее вещество на русском языке.

При получении от Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения информации о несоответствии данных об эффективности гомеопатических препаратов данным, содержащимся в инструкции, в соответствии со ст. 65 Федерального закона «Об обращении лекарственных средств» рассматривать вопрос о приостановке применения зарегистрированных гомеопатических средств.

Федеральной службе по надзору в сфере здравоохранения. Отслеживать и пресекать попытки продажи препаратов, содержащих значительное количество активного вещества, под видом гомеопатических. Контролировать направление в уполномоченный орган медицинскими организациями извещений о побочном действии, нежелательной реакции или отсутствии ожидаемого терапевтического эффекта гомеопатических средств

с применением, в случае выявления сокрытия, соответствующих санкций. При получении информации о несоответствии данных об эффективности гомеопатических препаратов данным, содержащимся в инструкции, направлять ее в Министерство здравоохранения РФ.

Совету Евразийской экономической комиссии. Внести в решение №76 «Об утверждении Требований к маркировке лекарственных средств для медицинского применения и ветеринарных лекарственных средств» и в решение №78 «О Правилах регистрации и экспертизы лекарственных средств для медицинского применения», принятые 3 ноября 2016 года, следующие дополнения и изменения:

- ввести обязательную маркировку гомеопатических препаратов, указывающую на отсутствие показаний к применению и доказательств эффективности;

- требовать указывать в инструкции к препарату и его общей характеристике, что препарат является гомеопатическим, не имеет доказанной эффективности и показаний к применению;

- требовать указывать в инструкции фактический состав гомеопатических средств, то есть для препаратов с разведением более C12, не содержащих действующих веществ, указывать только фактически содержащиеся в препарате вспомогательные компоненты (вода, лактоза и так далее);

- требовать при этом указывать предполагаемое действующее вещество в отдельном перечне «в приготвлении использованы»;

- указывать использованное в приготовлении предполагаемое действующее вещество на русском языке.

Федеральной антимонопольной службе. Обеспечить защиту граждан от недостоверной рекламы гомеопатии, заявляющей о наличии у гомеопатических препаратов лечебных свойств. Подобная реклама вводит потребителей в заблуждение и толкает их на использование неэффективного лечения, что может нанести вред здоровью.

Организациям, реализующим образовательные программы в сфере здравоохранения. Свернуть программы повышения квалификации по гомеопатии и иные курсы, включающие гомеопатию. Знакомить будущих медиков и врачей, проходящих последипломное обучение, с содержанием и критикой распространенных лженаучных представлений в области медицины, включая гомеопатические.

Страховым компаниям. Придерживаться стандартной практики, которая не предусматривает страховое покрытие услуг гомеопатов. Рассмотреть возможность исключения из «расширенных» страховых договоров гомеопатического лечения и лекарств по аналогии с тем, как из них исключены услуги народных целителей и «экстрасенсов».

Аптекам. Отказаться от совместной продажи лекарственных и гомеопатических препаратов и по возможности перейти к продаже гомеопатических препаратов за отдельным прилавком с выкладкой данных препаратов в отдельной витрине.

Фармацевтам и провизорам. Не рекомендовать пациентам гомеопатические препараты. Информировать пациентов, приобретающих гомеопатические препараты,

о том, что гомеопатия не имеет показаний и научных подтверждений клинической эффективности.

Врачам. Информировать пациентов о неэффективности и лженаучности гомеопатии, избегать сотрудничества с организациями, пропагандирующими и распространяющими гомеопатию, отказаться от неэтичной практики назначения гомеопатических препаратов для достижения эффекта плацебо и способствовать отказу от использования гомеопатии в своей медицинской организации.

Помнить о необходимости придерживаться стандартов лечения, которые в большинстве своем не предусматривают применения гомеопатии, и об обязанности созывать консилиум для назначения лечения, не указанно-го в стандартах.

Помнить об обязанности информировать Росздравнадзор о выявленных случаях неэффективности препаратов, в том числе гомеопатических. Подача уведомлений производится через автоматизированную систему «Фармаконадзор» (www.roszdravnadzor.ru/services/npr_ais).

Гомеопатам. Знакомиться с современными научными данными об эффективности гомеопатии. Критически относиться к неподтвержденным заявлениям производителей гомеопатических средств об их эффективности.

Не использовать гомеопатические препараты в качестве единственной терапии больных, нуждающихся в медицинской помощи. Рекомендовать пациентам посетить и негомеопатического врача для получения научно обоснованных рекомендаций. В случае угрожающих тяжелыми последствиями состояний отказаться от попыток лечить пациента гомеопатическими препаратами и направить его в систему официальной негомеопатической медицины.

Представителям СМИ. Не преподносить гомеопатию в качестве действенной или предположительно полезной медицинской практики. Позиционировать гомеопатию как лженауку в области медицины, в одном ряду с магией, целительством и «экстрасенсорикой». Препятствовать пропаганде и рекламе гомеопатии.

Преподавателям учебных заведений. Просвещать учащихся в вопросах методологии научных экспериментов и основных принципов доказательной медицины.

Пациентам и всем ответственным гражданам. Отказываться от приобретения и употребления гомеопатических препаратов, информировать врачей о своей позиции, а также распространять достоверную информацию о гомеопатии и поддерживать усилия по ее организационно-административному отделению от государственной и муниципальной системы здравоохранения.

Председатель Комиссии по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований РАН, академик **Е.Б.Александров**

Меморандум подготовлен при поддержке Просветительского фонда «Эволюция» и дополнен заключением экспертов, которые подробно разбирают «принципы гомеопатии», результаты исследований, свидетельствующие об отсутствии эффективности гомеопатических препаратов. и т.д. С экспертным заключением можно ознакомиться на сайте Комиссии: klrnai.ru

Новости науки

Физика сверхпроводников

Манипулирование абрикосовскими вихрями с помощью лазера

Ученые Московского физико-технического института (государственного университета) в кооперации с французскими коллегами из Университета Бордо разработали методику манипуляции одиночными вихрями Абрикосова в сверхпроводнике оптическим методом, которая может стать основой для создания надежных и быстрых запоминающих устройств, используемых в высокопроизводительных компьютерах. Результаты исследования международной группы недавно опубликованы в журнале *Nature Communications**.

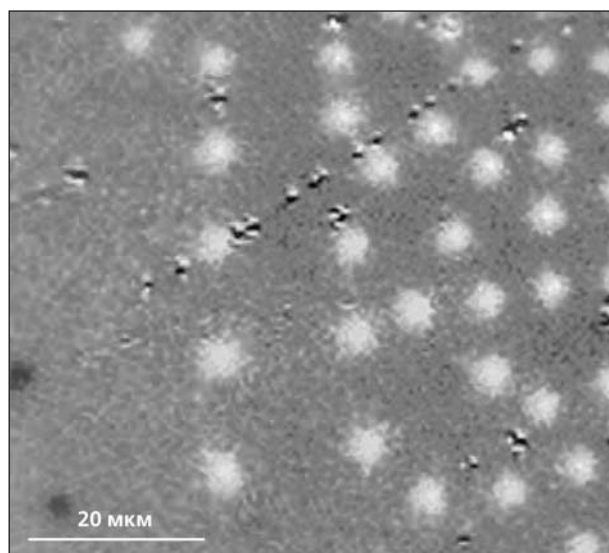
Явление сверхпроводимости — скачкообразное падение до нуля электрического сопротивления — наблюдается во многих материалах при низких температурах (от -273° до -70°C). Переход в сверхпроводящее состояние сопровождается вытеснением магнитного поля из объема сверхпроводника (эффект Мейсснера), которое может быть

* *Veshchunov I., Magrini W., Mironov S. et al. Optical manipulation of single flux quanta // Nature Communications. 2016. Doi:10.1038/ncomms12801.*

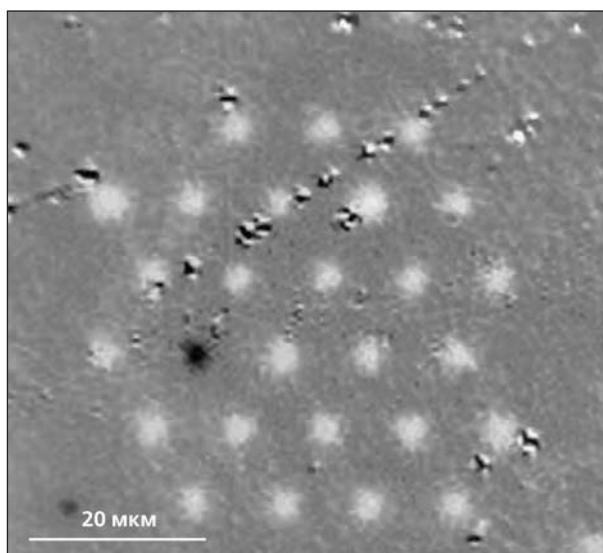
полным (магнитное поле внутри тела равно нулю) и неполным. Вещества, проявляющие полный эффект Мейсснера, называют сверхпроводниками первого рода, а частичный — сверхпроводниками второго рода.

Феномен неполного вытеснения впервые объяснил в классической работе 1957 г. А.А.Абрикосов, за что в 2003 г. был удостоен Нобелевской премии**. В этой работе он теоретически показал, что для сверхпроводника второго рода существует некая область магнитных полей, где он находится в смешанном состоянии: внешнее магнитное поле небольшими «порциями» проникает в него в виде своеобразных нитей, созданных вихревыми токами микрометровых размеров (теперь их именуют абрикосовскими вихрями). На каждый вихрь приходится квант магнитного потока. Чем больше индукция поля, тем больше вихрей в сверхпроводнике. Именно вихревая структура и определяет уникальные свойства сверхпроводников второго рода, которые сегодня используются в самых широких областях. Наиболее интересные из них связаны с генерированием и передачей электроэнергии, созданием уст-

** *Абрикосов А.А. О магнитных свойствах сверхпроводников второй группы // ЖЭТФ. 1957. Т.32. С.1442.*



Вихри, «замороженные» при охлаждении в магнитном поле напряженностью 0.14 эрстед.



Выстраивание одиночных вихрей Абрикосова в решетку лазерным пучком.

роиств для магнитно-резонансной томографии, ускорителей заряженных частиц (циклотронов и коллайдеров), установок для термоядерных исследований с магнитным удержанием горячей плазмы и измерительных приборов рекордной чувствительности и точности. В последние годы эта сфера расширилась за счет возможности применения сверхпроводников второго рода в вычислительной технике для построения логических схем и ячеек памяти. Отсюда и большой интерес физиков к изучению особенностей вихревой материи, развитию методов манипуляции вихревыми структурами, которые дают ключ к пониманию процессов, происходящих в устройствах на основе сверхпроводящих материалов.

В группе Б.Луниса из Университета Бордо с участием сотрудников лаборатории топологических квантовых явлений в сверхпроводящих системах Московского физико-технического института (МФТИ) провели уникальный эксперимент по термическому срыву (депиннингу) одиночных абрикосовских вихрей лазерным импульсом и продемонстрировали возможность управления их движением внутри сверхпроводника.

Манипулирование абрикосовскими вихрями невозможно без их визуализации. Она осуществлялась высокоразрешающим магнитооптическим методом. Вихри сдвигались в заданную точку с помощью сфокусированного лазерного пучка диаметром ≈ 1.0 мкм под действием температурного градиента. Если изменить температуру и размер теплового пятна, варьируя мощность лазера и диаметр пучка, можно найти порог, при котором происходит срыв вихрей. В статье по термодепиннингу вихревых кластеров моделируется распределение температуры вокруг источника тепла (лазерного пучка)*. Сопоставив данные по критической плотности тока, полученные из транспортных измерений и из экспериментов по локальному нагреву лазерным пучком, авторы работы показали, что критический температурный градиент, приводящий к депиннингу вихрей, напрямую связан с плотностью критического тока.

Кроме того, в ходе эксперимента была продемонстрирована манипуляция вихрями Абрикосова с помощью нагрева лазерным пучком тонких (толщиной 90 нм) пленок из ниобия. Напыление пленок и измерение их параметров выполнены в МФТИ. Вихри Абрикосова, имеющие тенденцию смещаться в зоны с более высокой температурой, ученые «заставляли» двигаться в прогретые лазером области тонких пленок. Проблема заключалась в том, что при перегреве сверхпроводимость в материале разрушается, поэтому нужно было очень точно регулировать интенсивность лазер-

ного излучения. Руководствуясь новой методикой, российские и французские физики разработали специальную программу управления лазером, которая позволила построить первые ячейки памяти на базе вихрей Абрикосова и использовать их для выстраивания на поверхности пленки из ниобия решетки вихрей.

Конечно, предложенная методика манипуляции отдельными вихрями еще далека от практического применения, однако реализация подобного эксперимента говорит о том, что ее можно использовать в работе по созданию сверхбыстрой памяти для квантовых компьютеров.

© И.С.Вещунов,

кандидат физико-математических наук
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Оптика

Как можно без потерь передавать сигнал в оптическом компьютере?

Ученые во всем мире пытаются создать компьютер на оптоэлектронных элементах. Однако в волноводах, которые стали для оптоэлектронного компьютера «проводами», существует проблема потерь энергии, возникающих из-за взаимодействия с окружающей средой, то есть сигнал может и не дойти до точки назначения, а значит, устройство работать не будет.

Системы, которые нельзя рассматривать без учета их взаимодействия с окружающей средой, называют открытыми, или, говоря языком математики, неэрмитовыми. В них оптический сигнал может и поглощаться, и усиливаться. В последние годы ученые уделяют большое внимание неэрмитовым системам, в которых существует баланс между усилением и потерями. Их называют РТ-симметричными, имея в виду симметрию системы по отношению к одновременной инверсии времени и координат**.

Недавние исследования показали, что использование оптических РТ-симметричных систем очень перспективно для создания оптических компьютеров. В нашей работе, опубликованной в журнале группы Nature — Scientific Reports, предложена модель неэрмитовой оптической волноводной системы, в которой большие потери компенсируются при помощи малого усиления***.

Оптический волновод — это канал, вдоль которого распространяются электромагнитные волны с фиксированной частотой собственных колеба-

* Gurevich A., Ciovati G. Effect of vortex hotspots on the radio-frequency surface resistance of superconductors // Phys. Rev. B. 2013. V.87. P054502.

** Зябловский А.А., Виноградов А.П., Пухов А.А. и др. РТ-симметрия в оптике // УФН. 2014. V.57. P.1177–1198.

*** Zyablovsky A.A., Andrianov E.S., Pukhov A.A. Parametric instability of optical non-Hermitian systems near the exceptional point // Scientific Reports. 2016. V.6. P.29709.

ний и строго определенным распределением поля в поперечном сечении (их еще называют собственными модами), и любую волну можно представить суммой собственных мод. Бывает так, что при некоторых параметрах неэрмитового волновода одна из его мод исчезает. Такую точку в пространстве параметров именуют особой точкой неэрмитовой системы.

В нашей работе рассмотрена система двух РТ-симметричных волноводов, один из которых содержит поглощающую среду, а второй — усиливающую. Интенсивность электромагнитной волны в ней периодически меняется — то возрастает, то убывает. Причина тому — взаимодействие электромагнитной волны, распространяющейся по одному из волноводов, с другим волноводом, что приводит к перетеканию поля из одного канала в другой. В зависимости от того, в каком из волноводов (поглощающем или усиливающем) находится максимум поля, интенсивность волны или уменьшается, или повышается. Скорость, с которой происходит процесс перетекания, зависит от расстояния между волноводами: чем оно меньше, тем больше скорость.

Мы обнаружили, что на РТ-симметричную оптическую систему из двух волноводов можно наложить параметрическое возмущение, которое позволит «настроить» перетекание между каналами таким образом, чтобы амплитуда электромагнитного поля в них возрастала даже в том случае, если потери в первом превосходят усиление во втором. Для этого нужно изготовить волноводы так, чтобы в точках, где интенсивность сигнала достигает максимума, расстояние между ними было минимальным. Это сконцентрирует поле в волноводе с усиливающей средой. Такое периодическое изменение параметров проводящих каналов позволит увеличивать мощность передаваемого сигнала. Если настроиться на особую точку РТ-симметричной системы, в которой наблюдается вырождение волноводных мод, то практически любое изменение параметров системы будет приводить к требуемому перераспределению поля. Проведенные в работе расчеты подтвердили реализуемость предложенной схемы.

С помощью описанной модели можно создавать устойчивый постоянный сигнал, способный надежно передавать информацию в оптических линиях связи. Такие перспективные волноводные системы могут найти применение в разрабатываемых оптических компьютерах.

© А.А.Пухов,

доктор физико-математических наук

Институт теоретической

и прикладной электродинамики РАН

А.А.Зябловский, Е.С.Андрианов,

кандидаты физико-математических наук

Всероссийский научно-исследовательский институт

автоматики имени Н.Л.Духова

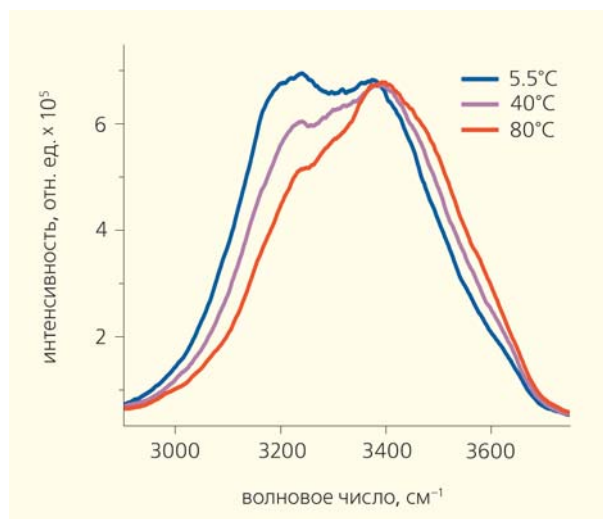
Москва

Лазерная физика

Лазерное дистанционное зондирование температуры водной поверхности

Арктический регион — ключевой индикатор изменений глобального климата. И в то же время он — «кухня погоды», поскольку играет большую роль в формировании и изменении климатических условий в Северном полушарии нашей планеты. Разработка достоверных теоретических моделей климатических изменений и прогноз вариаций глобального климата возможны лишь при наличии надежных экспериментальных данных об эволюции полей температуры Мирового океана, которые отражают миграцию энергии, запасенной в объеме воды. Напомним, что вода обладает рекордно большим значением теплоемкости, т.е. способностью накапливать и отдавать теплоту/энергию. Нагрев/охлаждение приповерхностного слоя на громадных территориях океана в Арктике оказывает значительное влияние на климат Северного полушария. Глубина термоклина в регионе составляет 30–50 м, поэтому необходима высокая точность измерения температуры для составления карты температурных полей приповерхностных вод.

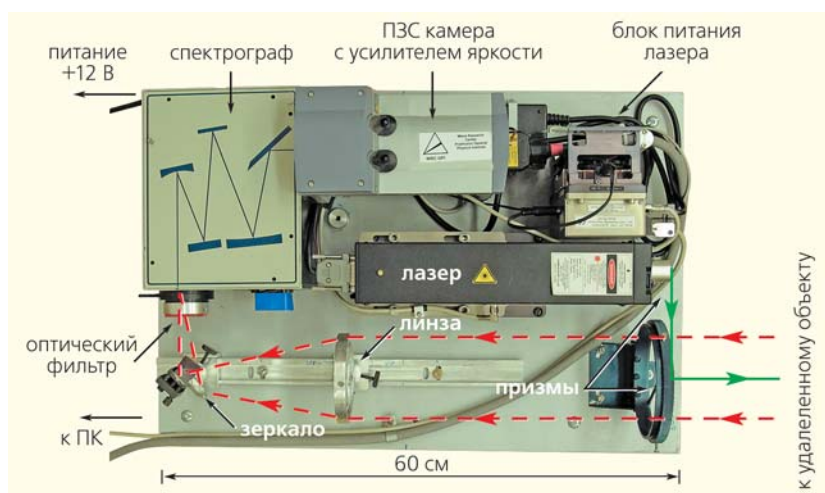
В настоящее время разработаны и применяются контактные методы измерения температуры автоматическими метеорологическими станциями, но мониторинг больших пространств Арктического региона возможен только с помощью дистанционного зондирования. Например, для измерения одного из важнейших параметров — температуры поверхности воды и льда — обычно используют спутниковые радары, микроволновые и лазерные скаттерометры, установленные на космических аппаратах или авианосителях.



Температурная деформация профиля полосы валентных колебаний O-H в спектре комбинационного рассеяния воды.

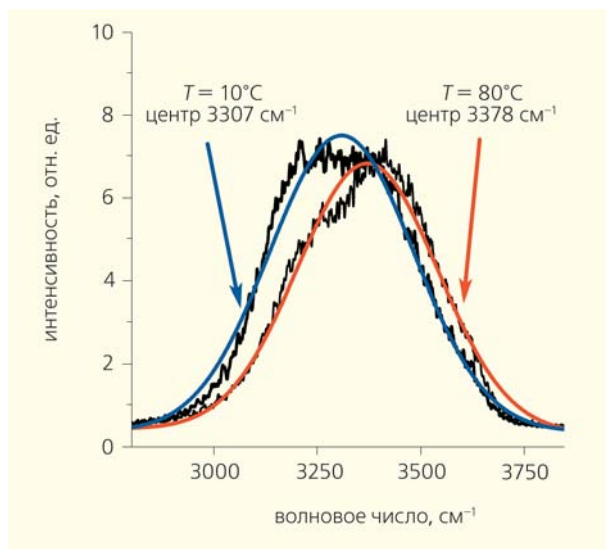
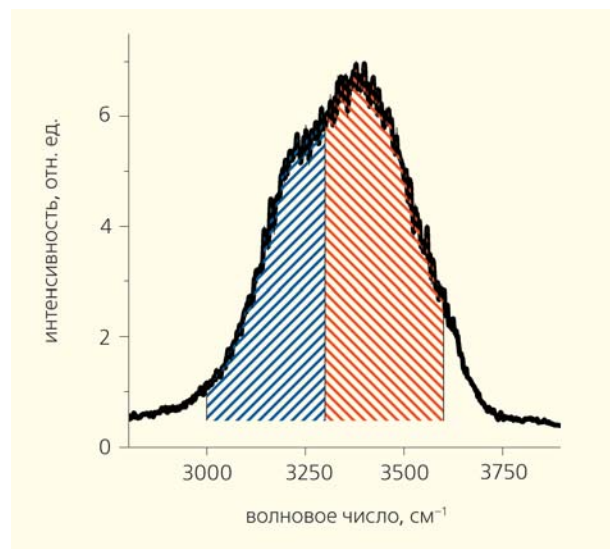
Однако существующие сегодня методы дистанционного измерения температуры поверхности океана имеют ряд принципиальных недостатков. Например, микроволновые скаттерометры регистрируют спектр теплового излучения тонкого поверхностного слоя воды толщиной лишь 10–30 мкм. В то же время прецизионные измерения температурного профиля выявили, что даже при слабом ветре над поверхностью воды температура верхних слоев толщиной до 50 мкм снижается на единицы градусов по сравнению с температурой на глубине нескольких сантиметров. В дополнение к этому данные радарных измерений сильно зависят от поверхностных капиллярных волн. Это приводит к противоречивым результатам при определении температуры и требует калибровки спутниковых измерений с помощью наземных станций, что в труднодоступных областях Арктики делать сложно.

Лазерное дистанционное зондирование — один из альтернативных методов дистанционного измерения температуры поверхности океана. Он основан на регистрации спектра спонтанного комбинационного рассеяния света на валентных колебаниях О–Н молекул воды и расчете значений температурной деформации огибающей ОН-полосы в области 3200–3400 см^{-1} . Принципиально важная особенность лазерного зондирования заключается в регистрации спектра комбинационного рассеяния для столба воды толщиной от десятков сантиметров до нескольких метров.



Компактный лидар комбинационного рассеяния света, разработанный в ИОФ РАН.

Возможность дистанционного измерения температуры верхнего слоя воды стимулировала развитие многочисленных подходов для количественной оценки деформации профиля ОН-полосы с целью повышения точности результатов: метод «двух плеч», который заключается в сравнении интегралов интенсивности двух полос в спектре комбинационного рассеяния; аппроксимация ОН-полосы двумя или несколькими компонентами; метод разностного сигнала. Группа ученых Института общей физики имени А.М.Прохорова (ИОФ) РАН предложила использовать в таких случаях новый метод — «взвешивание», который состоит в определении центра масс контура ОН-полосы с помощью его аппроксимации гауссовым профилем. Показано, что при повышении температуры воды положение центра ОН-полосы линейно смещается в сторону высоких частот с коэффициентом $\sim 1 \text{ см}^{-1}/\text{градус}$



Измерение температуры по деформации ОН-полосы методами «двух плеч» (слева) и «взвешивания».



Лазерное дистанционное зондирование с помощью компактного лидара.

(~30 ГГц/градус). Результаты исследования российских ученых опубликованы в журнале Американского оптического общества *Optics Letters**.

Спектры комбинационного рассеяния света для образца воды в кювете, помещенной в термостат, регистрировали дистанционно с помощью разработанного в ИОФ РАН компактного лидара (лазерного радара). Сравнение различных подходов выявило, что наивысшую точность дистанционного измерения температуры ($\pm 0.15^\circ\text{C}$) обеспечивает метод «взвешивания», который оказался более чем в два раза результативнее, чем любой другой. При этом он не требует участия оператора, что важно для создания автономных беспилотных платформ.

Проведенные измерения представляют особый интерес для подспутниковых исследований методами лазерного дистанционного зондирования, например с беспилотных авианосителей. Откорректированные по этим точкам карты распределения температуры поверхностного слоя Мирового океана, несомненно, важны для калибровки изображений спектральных анализаторов орбитального базирования при зондировании Земли из космоса.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Сверхчувствительные сенсоры и гигантское усиление полей оптическими метаматериалами»

© С.М.Першин, А.Ф.Бункин,

доктора физико-математических наук

Институт общей физики имени А.М.Прохорова РАН

В.Н.Леднев,

кандидат физико-математических наук

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Москва

М.Я.Гришин,

Московский физико-технический институт

(государственный университет)

* *Lednev V.N., Grishin M.Ya., Pershin S.M., Bunkin A.F.* Quantifying Raman OH-band spectra for remote water temperature measurements // *Opt. Lett.* 2016. V.41. P.4625–4628.

Археология. Палеосейсмология

По следам древних землетрясений в Горном Алтае

Территория Горного Алтая как часть Саяно-Алтайской горной страны — одна из активных сейсмических зон Евразии. Деформации земной коры, особенно усилившиеся в четвертичном периоде, привели к формированию в Горном Алтае блоковой структуры с абсолютными высотами хребтов до 4.5 тыс. м. По геолого-геофизическим данным, максимальные амплитуды вертикальных блоковых движений зарегистрированы в зонах сочленения горных хребтов и крупных межгорных впадин (Чуйской, Курайской, Уймонской и др.), где они составляют 1–4 тыс. м. Амплитуды вертикальных перемещений более мелких блоков достигают величин от первых десятков до нескольких сотен метров.

Фиксация землетрясений на территории Горного и Рудного Алтая началась во второй половине XVIII в. Согласно сейсмическим каталогам и публикациям, в XVIII–XIX вв. здесь зарегистрированы толчки разной силы (в 1761, 1764, 1768, 1771, 1783, 1785, 1787, 1824, 1829, 1857, 1867, 1882, 1887 и 1898 годах). Следующая серия сильных толчков отмечена в XX в.: в 1905, 1923, 1927, 1931, 1938, 1957, 1967, 1990, 1995, 1997 и 1998 годах. Значительное сейсмическое событие (Чуйское землетрясение магнитудой 7.3) произошло в начале XXI в. — 27 сентября 2003 г. Закономерно встает вопрос об изучении хронологии и параметров более древних сильных землетрясений на территории Горного Алтая. Выяснить это можно на основании ряда палео- и археосейсмологических данных.



Курган эпохи раннего железа некрополя Чултуков Лог-1 с признаками сейсмогенной деформации.



Горная долина нижней Катунь в окрестностях с.Манжерок.



Чуйская межгорная котловина.



Курган из некрополя Туралу-Джурт III на разломном уступе с признаками сейсмогенной деформации.

Впервые внимание на древние каменные курганы в прилегающих районах Монголии со следами сейсмогенных деформаций обратили В.Г.Трифонов и его соавторы*. Такие объекты выявлены нами в северной и юго-восточной частях Горного Алтая**. Одна из курганных групп — некрополь Чултуков Лог-1 — расположена в окрестностях с.Манжерок Майминского р-на Республики Алтай (зона активного Катунского разлома). На ее территории выявлено более десятка каменных курганов эпохи раннего железа с различными признаками сейсмогенных нарушений. Среди них — расположение крупных коллювиальных скальных блоков рядом с каменной конструкцией или перекрытие ими различных деталей надмогильных конструкций, направленное смещение камней с надмогильного сооружения кургана, деформация плит погребальных каменных ящиков и смещение костей человеческих скелетов относительно своего исходного анатомического расположения. Масштабность, поликультурность и сохранность некрополя Чултуков Лог-1 дают возможность получить интересные рекогносцировочные данные для выяснения последовательности сейсмических событий, хронология которых опирает-

ся на результаты радиоуглеродного датирования***. На основании комплекса радиоуглеродных датировок курганов со следами сейсмогенных нарушений, особенностей их расположения (периферия, центр), стратиграфии и других признаков можно предварительно выделить два древних землетрясения. Одно из них, возможно, произошло не позднее V в. до н.э. и предшествовало сооружению некрополя Чултуков Лог-1. Другое случилось в период с IV в. до н.э. по I в. н.э., когда сооружалась курганная группа.

Запланированные на полевой сезон 2017 г. археологические исследования на курганной группе Туралу-Джурт III, расположенной в зоне Курайского активного разлома (северный борт Чуйской впадины), помогут дополнить данные по древним землетрясениям Горного Алтая. Изучение поверхностных разрывов сильных древних землетрясений в районе курганного могильника позволило определить возраст одного из них — около 3400–3100 лет, что соответствует периоду, предшествовавшему сооружению некрополя. Моментальная магнитуда землетрясения составила 7.2–7.6. Археологический анализ курганов, а также радиоуглеродное датирование артефактов дадут возможность определить возраст более молодого, но не менее сильного землетрясения, нарушившего могильные конструкции. Таким образом, выполняемые нами исследования открывают новые возможности для реконструкции древних сейсмических событий на территории Алтая и изучения их влияния на историко-культурные процессы обширного горного региона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-50-00036).

© **Е.В.Деев**,

кандидат геолого-минералогических наук
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
имени А.А.Трофимука СО РАН
Новосибирск

А.П.Бородовский,

доктор исторических наук
Институт археологии и этнографии СО РАН

* Трифонов В.Г., Востриков Г.А., Кожурин А.И. и др. Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов. М., 1988.

** Бородовский А.П., Бородовская Е.Л. Археологические памятники горной долины нижней Катунь в эпоху палеометалла. Новосибирск, 2013; Deev E.V., Tiurova I.V., Borodovskiy A.P. et al. Unknown large ancient earthquakes along the Kurai fault zone (Gorny Altai): new results of palaeoseismological and archaeoseismological studies // Int. Geol. Rev. 2017. V.59. P.293–310.

*** Бородовский А., Кратчик М., Олещак Л. Хронология культурных и геологических событий по материалам радиоуглеродного датирования курганной группы эпохи раннего железа Чултуков Лог-1 // Теория и практика археологических исследований. 2016. №2. С.109–122.

Физика. Химия. Науковедение

А.Л.Бучаченко. ОТ КВАНТОВЫХ СТРУН ДО ТАИН МЫШЛЕНИЯ... ЭКСКУРС ПО САМЫМ ЗАВОРАЖИВАЮЩИМ ВОПРОСАМ ФИЗИКИ, ХИМИИ, БИОЛОГИИ, МАТЕМАТИКИ. М.: ЛЕНАНД, 2017. 188 с.

Книга объединяет заметки автора о науке и научном творчестве. О науке — самой высокой и таинственной части нашей цивилизации, которая поддерживает устойчивое существование уже достигнутого и добывает новые знания. О физике — науке о фундаменте мироздания. О химии — центральной науке, в которую погружен весь мир. По мнению автора, если химия — еще не вся жизнь, то вся жизнь — это химия... Это также заметки и о биологии — науке о главном, о жизни, о живом мире, об уме, мышлении и гениальности. О математике — царственной науке. Книга о том прекрасном, величественном и добром, что есть в науке, о тех замечательных людях, которые ее делают. Она об очаровании ума и умных людях, об их поразительной гениальности. О способности превращать тайное в явное, непредсказуемое в неизбежное — в чем и заключается интрига восхитительной игры, именуемой наукой. В книге приведено много интересных и малоизвестных фактов, например такой: «Не все знают, что Лондонское Королевское общество... избрало своим членом Александра Даниловича Меншикова, человека безграмотного... А диплом об избрании был подписан Исааком Ньютоном».



Астрономия

Л.К.Пелтье. СВЕТ НОЧНОГО НЕБА. ПРИКЛЮЧЕНИЯ ЗВЕЗДОЧЕТА / Пер. с англ. Д.Ф.Белоножки, А.М.Стороженко; ред. И.В.Григорьева. Ярославль: ГАУК ЯО «Центр имени В.В.Терешковой», 2016. 354 с.



Перевод общепризнанного шедевра научно-популярной литературы (*Peltier L.C. Starlight nights. The Adventures of a Star-Gazer. Cambridge: F+W Media, 1999*). Книга, впервые опубликованная в 1965 г., написана астрономом-любителем, одним из лучших наблюдателей (им было проведено более 132 тыс. наблюдений) Американской ассоциации наблюдателей переменных звезд (AAVSO), который превратил наблюдение за космическими объектами в смысл всей жизни. Это прослеживается во всем: и в нежных словах о телескопах, и в описании комет и процесса их поиска (а он стал автором открытия 12 новых комет). По мнению канадского астронома Д.Леви, «на свете есть немало книг, объясняющих, как наблюдать звездное небо, но только «Свет ночного неба» отвечает на вопрос: ради чего». В воспоминаниях и размышлениях автора центральная тема многолетних регулярных астрономических наблюдений живо переплетается с его естественнонаучными увлечениями, любопытными житейскими ситуациями и познавательными фактами самого разного толка. Каждая глава сопровождается рисунком автора, а также примечаниями переводчиков, поясняющими некоторые имена и события. Как прекрасно сказано в предисловии к американскому изданию, и через десятки лет эта книга будет вдохновлять новые поколения звездочетов — детей технологической эры, увлеченных вечным таинством, которое происходит после заката. С таким путеводителем, как эта книга, никто никогда не заблудится в темноте ночи.

Биохимия. Молекулярная биология

М.А.Никитин. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ. ОТ ТУМАННОСТИ ДО КЛЕТКИ. М.: Альпина нон-фикшн, 2016. 516 с.



Автор объединил в популярный рассказ новую информацию (из научных и научно-популярных публикаций всего мира за последние 15 лет), которая позволяет представить современное состояние проблемы происхождения жизни. Достижения в области поиска экзопланет, изучения Солнечной системы с помощью автоматических межпланетных станций, анализа древних горных пород и метеоритов позволили узнать много нового об условиях, существовавших на древней Земле в те времена, когда жизнь на ней только зарождалась. Успехи биохимии и молекулярной биологии привели не только к возникновению синтетической биологии, способной создавать генетически модифицированные организмы, но и, вероятно, к пониманию, по каким причинам эволюция предпочла существующий вариант генетического кода иным возможным. Обсуждаются следующие проблемы: место происхождения жизни; получение нуклеотидов из продуктов атмосферной фотохимии; происхождение хиральной чистоты; механизмы копирования РНК и начало РНК-мира; происхождение рибосом, белков и генетического кода; устройство генов, механизмы копирования и происхождения ДНК; происхождение мембран и мембранной энергетики; происхождение фотосинтеза и др. Книга написана на основе курсов лекций автора (которые он читал с 2010 г. в Летней экологической школе и с 2014 г. в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова) и цикла его статей в журнале «Химия и жизнь», отмеченных литературной премией имени Александра Беляева.

Материаловедение

Н.Д.Дронова. ЧТО НАДО ЗНАТЬ О СТАРИННОМ КИТАЙСКОМ ФАРФОРЕ: АТРИБУЦИЯ, ДИАГНОСТИКА ДРЕВНОСТИ, СТИЛИ: Справочник-энциклопедия. М.: ООО «ТИПОГРАФИЯ КЕМ», 2016. 288 с.

По всему миру встречается очень много подлинных изделий из китайского фарфора, неправильно определенных как имитация. Императорские вазы, изготовленные в эпоху правления императора Циньлуна (1736–1795), датируются на аукционах как, вероятно, республиканский период или начало XX в. Фарфоровые предметы династий Сун и Юань можно встретить на блошиных рынках Юго-Восточной Азии, которая была огромным рынком сбыта для китайской торговли в течение последней тысячи лет. Автор книги — профессор, доктор технических наук, член Союза художников России — наглядно (используя макро- и микросъемку) разъясняет, как отличить подлинный старинный фарфор от подделки, каков алгоритм оценки и диагностики антикварного изделия, каковы особенности атрибуции китайского фарфора и как проводится экспертиза его качества. В отдельных главах рассмотрены современные подделки под антикварный фарфор, марки на китайском фарфоре, приведен стилистический анализ изображений и разбирается их символика. Изделия из фарфора обозначаются именем правящей династии, а внутри ее — именами отдельных императоров. Завершают великолепно иллюстрированный справочник-энциклопедию главы о разновидностях старинного китайского фарфора, об экспортном и об императорском фарфоре.



История науки. Физика

ПЕТР НИКОЛАЕВИЧ ЛЕБЕДЕВ. К 150-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ / Авторы-составители: В.М.Березанская, М.А.Лукичев, Н.И.Шаульская. Ярославль: Издательство «РМП», 2016. 192 с.

Альбом посвящен 150-летию со дня рождения П.Н.Лебедева — первого русского физика мирового уровня. Слава и признание пришли к нему благодаря поразительным по виртуозности и тонкости опытам по изучению светового давления и определению его величины. В 1900 г. ученый измерил давление света на твердые тела, а в 1910-м решил еще более трудную задачу — установил, какое давление оказывает свет на газы. Выдающийся экспериментатор был и талантливым руководителем. Именно Лебедев создал первую в России научную школу и семинар, которые сыграли важную роль в развитии физики. Он воспитал группу ученых (П.П.Лазарев, Н.Н.Андреев, В.К.Аркадьев, Н.А.Капцов, Т.П.Кравец), некоторые из которых стали основателями собственных научных школ. Именно Лебедев заложил традиции коллективной исследовательской работы, без которой современную физику трудно себе представить.

Альбом построен по годам и по основным событиям в жизни ученого. Материалы получены из личных архивов его внучатой племянницы М.Н.Лебедевой и внучатого племянника В.А.Лебедева, из фонда П.Н.Лебедева Санкт-Петербургского филиала Архива РАН и из кабинета истории Физического института имени П.Н.Лебедева РАН. Рассказ, великолепно проиллюстрированный фотографиями и документами, начинается с семьи и детских лет, далее ведет читателей к годам студенчества в Императорском техническом училище и в Страсбургском университете, к работе профессором Московского университета. На снимках — лица людей, окружавших Лебедева, и читатель видит, как они менялись с возрастом; виды городов, где он жил и работал; много бытовых снимков, даже сценки из любительских спектаклей, в которых он участвовал. Есть страницы научных журналов с публикациями ученого, обложки и развороты написанных им книг, чертежи и схемы, выполненные его рукой, — от еще юношеских до профессиональных. Приведены открытки и страницы личных писем и дневников, а также планы работ, программы его лекций. Есть дипломы и извещения об избрании Лебедева членом научных обществ, институтов и академий разных стран, даже официальные прошения и уведомления. Представлены изображения лабораторий, где работал ученый, и созданных им приборов. Рассказ о разгроме Московского университета иллюстрирует, например, факсимиле прошения Лебедева об увольнении из университета и составленный им план части Миусской площади с указанием места для постройки Народного университета имени А.Л.Шанявского, есть фотография здания в Мёртвом переулке, в полуподвальном этаже которого в 1911 г. была организована его новая лаборатория. В целом, жизнь и творчество великого ученого представлены в альбоме в поразительной полноте и в точном контексте эпохи. Большая часть помещенных в альбом материалов публикуется впервые.



Подсказка Пьера Кюри: об открытии отрицательной люминесценции

В.И.Иванов-Омский

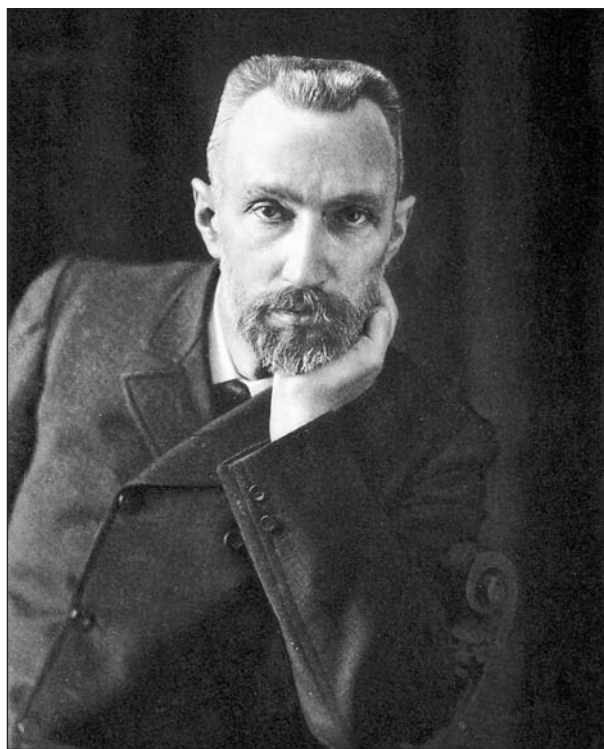
доктор физико-математических наук

Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

У каждого научного открытия, крупного или небольшого, есть своя предыстория. Где-то привел к успеху целенаправленный поиск, где-то — интуиция, где-то — счастливая случайность. Бывало, что путеводной становилась мысль кого-нибудь из выдающихся ученых прошлого. Расскажу одну историю из своего собственного опыта, которая может оказаться поучительной.

Но сначала вспомним об известном французском физике Пьере Кюри, открывшем со своей супругой Марией Кюри явление радиоактивности радия, за что пара была удостоена Нобелевской премии (1903). Ему за сравнительно короткий жизненный срок (он трагически погиб в расцвете сил под колесами парижского лихача) удалось сформулировать ряд важнейших физических законов, носящих его имя. Однажды мне попались биографии Пьера и Марии Кюри, написанные их дочерью Евой. Особенно меня заинтересовали строки, где шла речь о вкладе ее отца в изучение явлений симметрии в природе, в частности симметрии прямых и обратных явлений, и описывающих их законов. В самом кратком и весьма грубом изложении идея Кюри состоит в том, что законы природы всегда содержат элементы симметрии, и распознавание этих элементов должно вести к открытию новых законов. Я воспринял эту мысль как прямую подсказку путей поиска неизвестных ранее явлений. И теперь перейду к моей истории.

В начале 60-х годов прошлого века все уже знали, что такое полупроводник... Правда, для полноты картины отметим, что всего лишь в середине 50-х на Московском вокзале в Ленинграде можно было наблюдать такую картину. После прибытия очередного поезда по громкой связи передавалось сообщение: «Участников Всесоюзного совещания по полупроводникам просят пройти регистрацию в левой части вестибюля». В течение всего дня к столику, за которым восседали мы, «добровольно» призванная для обслуживания совещания молодежь, подходили проводники прибывших поездов и спрашивали: «А нам не надо? Кто такие полу-



Пьер Кюри (1859–1906).

проводники? Нанятые в один конец, что ли?». Но в начале 60-х полупроводники уже широко внедрялись в технику и быт: они стали базой транзисторов, тиристоров, фотопреобразователей и множества других электронных приборов. Это стало общеизвестным, однако то, что полупроводник способен излучать свет, догадывались немногие.

В начале 60-х мировое научное сообщество было буквально потрясено сообщением об изобретении источников когерентного излучения — мазера и затем лазера, что нашло отражение в серии нобелевских наград. И весь «физический» люд бросился на исследование источников излучения, в том числе на основе полупроводников, а также на создание работающих с излучением ус-

тройств. На развитие этого направления потекли солидные финансовые потоки.

Не остался в стороне и автор этого опуса: я в то время занимался материалами для детекторов ИК-излучения, построенных на основе фотоэлектромагнитного эффекта (называемого еще фотомагнитоэлектрическим), который открыли советские физики И.К.Кикоин и М.М.Носков еще в 1933 г. Мотивация этих работ определялась и тем обстоятельством, что детекторы теплового излучения имели важные военные приложения, а работа в этом спектральном диапазоне сталкивалась с определенными трудностями. Как известно, возникновение электрического поля внутри полупроводника под действием излучения происходит при разделении генерируемых электронно-дырочных пар энергетическим барьером, высота которого определяется шириной запрещенной зоны. Но ее величина, согласующаяся с требованиями для детекторов ИК-излучения (рассчитанных на длину волны 5 мкм и более, как, например, в случае InSb), мала настолько, что при комнатной температуре не способна создать электростатический барьер достаточной высоты, чтобы препятствовать тепловому перебору через него электронов и дырок, т.е. обеспечить разделение электронно-дырочных пар. А практическая ценность любого ИК-детектора прямо пропорциональна величине его рабочей температуры. По этой причине еще в 50-х годах и вспомнили о фотоэлектромагнитном эффекте Кикоина—Носкова, в котором разделение генерируемых излучением электронно-дырочных пар производится магнитным полем под действием сил Лоренца. Надо сказать, это был весьма модный в конце 50-х эффект из-за его применений для разработки ИК-детекторов и для измерения скорости поверхностной рекомбинации в полупроводниках. Напомним кратко его суть.

При освещении полупроводника светом с волновым вектором, который направлен перпендикулярно приложенному магнитному полю **B** (так называемая геометрия Войгхта), в третьем перпендикулярном направлении возникает электрическое поле **E**, как показано на рис.1. По своей физической природе эффект Кикоина—Носкова представляет собой своеобразный эффект Холла на токе, сформированном диффузией образованных при поглощении света электронно-дырочных пар вглубь образца* и, таким образом, характеризуется векторным соотношением:

$$[\mathbf{W} \times \mathbf{B}] = \mathbf{E}, \quad (1)$$

где **W** — вектор Умова—Пойнтинга электромагнитного излучения, описывающий перенос энергии волной.

* Эффект наблюдается при сильном поглощении, когда концентрация фотовозбужденных носителей неоднородна и происходит их диффузия от освещенной стороны образца к неосвещенной.

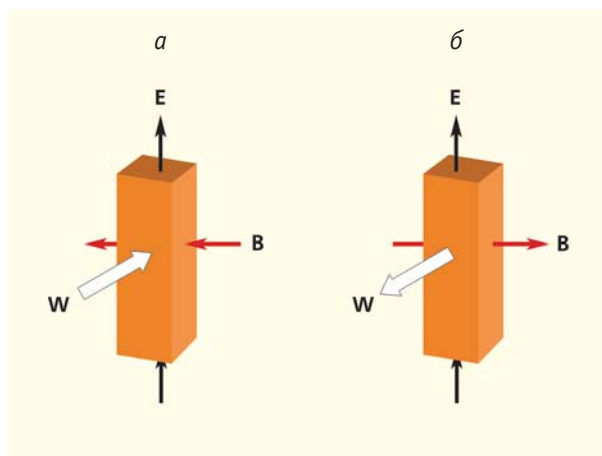


Рис.1. Геометрия векторов Умова—Пойнтинга **W** (вектора плотности потока энергии электромагнитной волны), электрического (**E**) и магнитного (**B**) полей для фотоэлектромагнитного эффекта Кикоина—Носкова (а) и электромагнитной люминесценции (эффекта Бернара, б).

По иронии судьбы, когда я в 1955 г. появился в лаборатории фотоэлектрических явлений в полупроводниках Физико-технического института имени А.Ф.Иоффе АН СССР, мне поручили исследовать эффект Холла в синтезируемых там полупроводниковых соединениях, снабдив для этого старым и никому не нужным электромагнитом. Большим недостатком этого первого в моей жизни прибора было то, что один из его полюсов содержал высверленный продольный канал, из-за которого магнитное поле в зазоре между полюсами оказывалось недостаточно однородным. Бывало, я поминал худым словом тех, кто просверлил этот канал. И уже много лет спустя, когда этот магнит был сдан в металлолом моими учениками, я случайно узнал, что канал просверлил знаменитый академик Исаак Константинович Кикоин для своего аспиранта Михаила Носкова. И с помощью именно этого магнита было совершенно открытие фотомагнитного эффекта, получившего их имя. Ирония судьбы состояла в том, что мне пришлось неоднократно возвращаться к исследованию эффекта Кикоина—Носкова в ряде новых узкощелевых полупроводников, самому или с моими учениками. В результате у меня сформировалась четкая картина этого эффекта с характерной для него группой элементов симметрии. Элементов этих всего три: взаимно перпендикулярные магнитное (**B**) и электрическое (**E**) поля и излучение, характеризуемое вектором Умова—Пойнтинга **W**. И сам эффект описывается их векторным произведением $\mathbf{E} = k [\mathbf{W} \times \mathbf{B}]$, т.е. излучение **W**, направленное перпендикулярно магнитному полю **B**, генерирует в полупроводнике электрическое поле **E** (k — коэффициент, который учитывает параметры полупроводника). Симметрия векторного произведения характерна для многих гальвано- и термомагнитных явлений в проводя-

щих средах, и задание любой пары из них определяет третий вектор, образуя обширную группу наблюдаемых явлений. Кто-то подсчитал, что таких эффектов, в которых проявляется поведение, характерное для математической группы симметрий векторного произведения, набирается несколько сотен. Анализируя эффект Кикоина—Носкова с точки зрения теории групп и опираясь на идеи Пьера Кюри о важной роли элементов симметрии в явлениях природы, я понял, что если рассматривать соотношение (1) как определение инварианта группы фотомангнитных явлений, то, совершая циклическую перестановку в нем, получим:

$$[\mathbf{E} \times \mathbf{B}] = \mathbf{W}, \quad (2)$$

т.е. помещение полупроводника в скрещенные электрическое и магнитное поля должно вести к генерации в нем излучения, как показывает рис.1,б. Переходя с языка теоретических абстракций к качественным представлениям, физическую причину подобного эффекта снова следовало бы искать в изменении распределения носителей заряда в объеме под действием полей: в той области, где электронов/дырок стало больше, излучательная рекомбинация будет идти интенсивнее, что и породит избыточное по отношению к равновесному излучение. Но подробнее об этом чуть позднее.

Можно было ожидать, как я думал, возникновения излучения в скрещенных электрическом и магнитном полях в направлении их векторного произведения $[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$, т.е. перпендикулярно обоим приложенным полям [1]. Я помчался в лабораторию и принялся уговаривать сотрудников своей немногочисленной группки проверить мою догадку. Но никакие ссылки на моего любимого Пьера Кюри мне не помогли. Часть коллег только pokrutili пальцем у виска, а наиболее деликатные сослались на занятость. Так продолжалось довольно длительное время, пока в 1963 г. у меня не появился студент-дипломник Владимир Смирнов. Я предложил ему в качестве дипломной работы исследовать в InSb, полупроводнике с большой подвижностью электронов, эффект, который мы называли электромагнитной люминесценцией [1, 2]. Но время было упущено, и вскоре я обнаружил коротенькую заметку французского исследователя М.Берна-

ра [3] о регистрации с помощью болометра ИК-излучения от пластинки германия, помещенной в скрещенные электрическое и магнитное поля. Излучение было слабым, и его спектр записать не удалось. Другое дело у нас: понимая, что эффективность магнитоэлектрической люминесценции определяется величиной подвижности носителей заряда, мы выбрали для эксперимента полупроводник InSb, в котором подвижность электронов на порядок выше, чем в Ge. Поборов досаду на упущенное открытие, мы с молодым задором принялись за работу. Более удачный выбор объекта исследования позволил нам на несколько порядков увеличить сигнал, что, в свою очередь, дало возможность изучить эффект Бернара более детально. Нам, в частности, удалось впервые зарегистрировать его спектр [2]. Оставшееся чувство неудовлетворенности из-за потери приоритета было вскоре компенсировано открытием «противоположного» явления, которое впоследствии приобрело важное практическое значение. Речь идет об обнаружении отрицательной люминесценции [1, 4]. Дело было так.

Дипломный проект двигался к успешному завершению, и как-то вечером, зайдя в лабораторию, я обнаружил своего дипломника в некотором смущении. При переключении направления магнитного поля менялся знак сигнала на фотоприемнике, хотя никакой видимой электрической связи между образцом и фотоприемником не было, кроме распространявшегося между ними излучения. На рис.2 показано то, что было видно на экране осциллографа при инвертировании направления магнитного поля. То же самое происходило при смене полярности электрического поля. Заявив, что чудес на свете не бывает и что-то вроде того, что свет назад не ходит, я посоветовал еще раз проверить схему коммутации. Студент очень обиделся и предложил сделать это вместе, так как был уверен в правильности схемы. Проверили. Все было правильно. Озадаченный, я отправился домой, но еще по дороге понял, что мы наблюдали неизвестное ранее явление модуляции уровня равновесного теплового излучения гранью кристалла, обращенной к приемнику. При одном направлении полей интенсивность излуче-

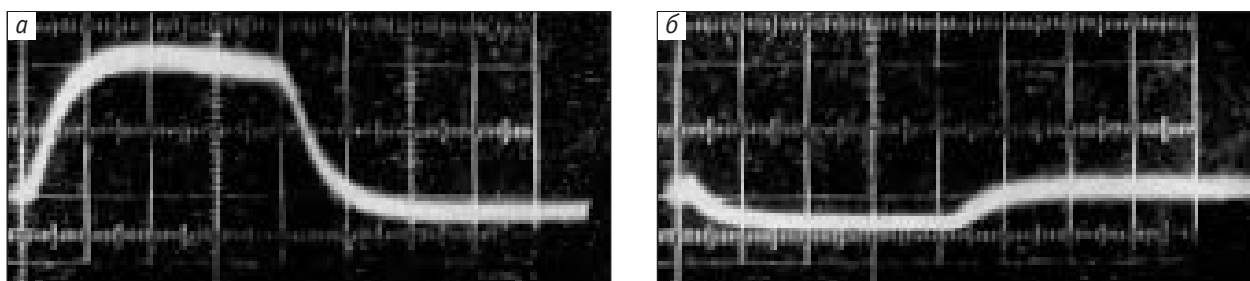


Рис.2. Осциллограмма наблюдаемых импульсов сигнала положительной и отрицательной люминесценции (рекомбинационного излучения) при инвертировании направления магнитного поля \mathbf{B} . Горизонтальная развертка 2.5 мкс/см: $B > 0$ (а), $B < 0$ (б).

ния превышала уровень равновесного излучения (как это обнаружил Бернар), а при противоположном направлении оказывалось меньше его.

Встал вопрос о механизме наблюдаемого явления, который мы связали с магнитоконцентрационным эффектом, незадолго до этого описанным Х.Велькером [5]. В данном эффекте в полупроводнике со смешанным типом проводимости*, помещенном в скрещенные электрическое и магнитное поля, под действием силы Лоренца происходит перераспределение концентрации носителей заряда между противоположными гранями образца. Если под действием импульса напряжения на грани, обращенной к приемнику излучения, концентрация носителей заряда превышала равновесную, то рекомбинация неравновесных носителей заряда генерировала излучение и на приемнике возникал сигнал, совпадающий по знаку с импульсом напряжения. Реверсия направления магнитного поля уменьшала концентрацию носителей заряда вблизи излучающей грани относительно ее равновесного значения, что воспроизводилось на экране осциллографа как временной провал в равновесном излучении в течение действия импульса электрического напряжения. Результат в виде положительного и отрицательного сигналов на приемнике излучения изображен на рис.2. Именно инверсия знака регистрируемого сигнала относительно знака напряжения возбуждающего импульса объясняет происхождение теперь уже общепринятого в литературе термина — отрицательной люминесценции. Поскольку в полупроводнике работают только собственные, а не примесные электроны и дырки, их рекомбинация

происходит за счет межзонных переходов с излучением фотонов с энергией, равной величине запрещенной зоны полупроводника. Это и определяет спектры электромагнитной люминесценции, как отрицательной так и положительной (оба генерируются за счет одних и тех же оптических переходов).

Отрицательная люминесценция вызывает недостаток фотонов вблизи соответствующей грани кристалла, что при стремлении системы к равновесию ведет к отбору фотонов от окружающей среды. И если источник положительной люминесценции может рассматриваться как испаритель фотонов, то источник отрицательной работает в качестве как бы фотонного холодильника для теплового фонового излучения. Это обстоятельство открывает ему перспективу применения в измерительных устройствах. Действительно, в основе работы любой измерительной системы лежит процесс сравнения с эталоном, причем процесс этот повторяется тем чаще, чем выше требования к точности измерений. Для средней инфракрасной области спектра таким эталоном на протяжении почти века служило так называемое абсолютно черное тело со стандартными характеристиками излучения. Но данный объект уже не всегда гармонично вписывается в архитектуру современной техники, имеющую постоянную тенденцию к уменьшению габаритов и мощности потребляемой энергии в сочетании с повышением быстродействия. Всем этим требованиям способны удовлетворить полупроводниковые генераторы (источники) отрицательной люминесценции, что более подробно описано в обзоре [6].

А в заключение повторим основную мораль нашей истории — идеи Пьера Кюри о важной роли элементов симметрии в законах природы в очередной раз оказались плодотворными. ■

* Смешанный тип проводимости подразумевает участие в проводимости отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных дырок.

Литература

1. *Иванов-Омский В.И., Коломиец Б.Т., Смирнов В.А.* Рекомбинационное излучение в InSb при магнитоконцентрационном эффекте // ДАН СССР. 1965. Т.161. №6. С.1308–1309.
2. *Иванов-Омский В.И., Коломиец Б.Т., Смирнов В.А.* Спектр электромагнитной люминесценции в InSb // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т.3. Вып.7. С.287–291.
3. *Bernard M.J.* Effet electromagnetophotonique dans le germanium // J. Phys. Chem. Solids. 1959. V.8. P.332–336.
4. *Elliott C.T.* Negative luminescence and its applications // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 2001. V.359. P.567–579.
5. *Welker H.* Zur Theorie der galvanomagnetischen Effekte bei gemischter Leitung // Z. Naturforsch. 1951. V.6a. P.184–191.
6. *Иванов-Омский В.И., Матвеев Б.А.* Отрицательная люминесценция и приборы на ее основе // ФТП. 2007. Т.47. Вып.3. С.257–278.

Информация 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. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Статьи рецензируются и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию материалы можно

прислать по электронной почте. Текст статьи, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате doc, txt или rtf. Иллюстрации предоставляются отдельными файлами. Принимаются векторные и растровые изображения в форматах EPS или TIFF (без LZW-компрессии). Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (Bitmap) — не менее 800 dpi. Векторные изображения должны быть выполнены в программе CorelDRAW или Adobe Illustrator.

Поступление статьи в редакцию подтверждает полное согласие автора с правилами журнала. См.: www.ras.ru/publishing/nature.aspx; www.naukaran.com/zhurnali/katalog/priroda/

ПРИРОДА

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Научные редакторы
М.Б.БУРЗИН

Т.С.КЛЮВИТКИНА

К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА

М.Е.ХАЛИЗЕВА

О.И.ШУТОВА

А.О.ЯКИМЕНКО

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод
А.О.ЯКИМЕНКО

Графика, верстка:
С.В.УСКОВ

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Президиум Российской академии наук

Издатель: ФГУП «Издательство «Наука»
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

Адрес редакции: 117997,
Москва, ул.Профсоюзная, 90 (к.417)
Тел.: (495) 276-70-36 (доб. 4171, 4172)
E-mail: priroda@naukaran.com

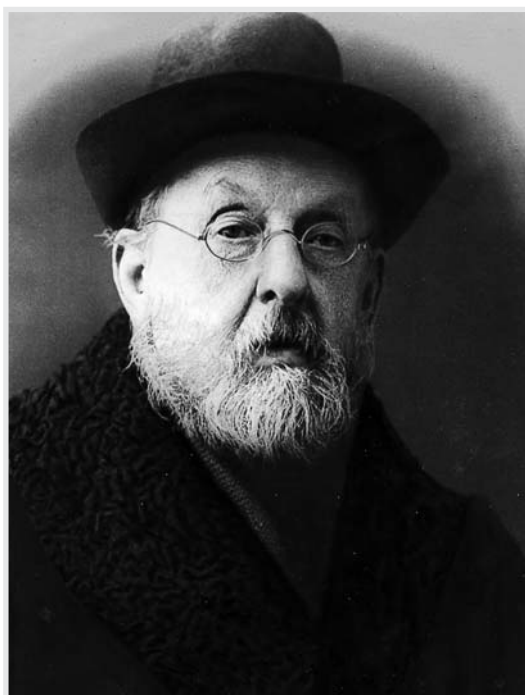
Подписано в печать 28.02.2017
Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная. Офсетная печать
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2
Тираж 280 экз.
Заказ 73
Цена свободная

Отпечатано ФГУП «Издательство «Наука»,
(типография «Наука»)
121099, Москва, Шубинский пер., 6

www.ras.ru/publishing/nature.aspx

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.

в следующем номере



Наш знаменитый соотечественник К.Э.Циолковский, первым обосновавший возможность космических полетов с помощью реактивных двигателей, в 1924 г. предложил использовать для создания реактивной тяги энергию направленного электромагнитного излучения: «Есть самый заманчивый способ приобретения скорости. Это — передача энергии снаряду извне, с Земли. <...> Она ему передается с планеты в образе параллельного пучка электромагнитных лучей с небольшой длиной волны». Создание лазеров открыло путь к реализации этой идеи. Дальнейшее освоение ближнего космоса, ориентированное на создание орбитальной инфраструктуры из пилотируемых станций, баз на Луне для освоения ее недр и т.п., требует экономически эффективных воздушно-космических средств многократного запуска пилотируемых и беспилотных аппаратов. Пока, к сожалению, масса полезного груза, выводимого существующими ракетными носителями на околоземные орбиты, в среднем составляет всего 3–4% от стартовой массы носителя. Проекты лазерных реактивных двигателей, которые должны помочь улучшить данное соотношение, разрабатываются с 80-х годов XX в. Насколько удалось продвинуться по этому пути и почему подобные космические корабли пока не летают?

Ю.А.Резунков ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ РЕАКТИВНОЙ ТЯГИ

