

ПРИРОДА

7 2020

Дальность загрязняющих выбросов от мазутных ТЭЦ в зависимости от высоты труб, господствующих ветров в регионе и размеров зольных частиц может достигать 15 километров.

ГРЕТЬ, ДЫМИТЬ И ЗАГРЯЗНЯТЬ:

ИСТОРИЯ МАЗУТА
В РОССИИ

С. 3

ISSN 0032-874X
9 770032 874009

20

ПРИРОДА

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
Издается с января 1912 года

Главный редактор
академик, доктор биологических наук **А.В.Лопатин**

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.Батурин**, 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**, член-корреспондент, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, иностранный член РАН, профессор **Е.Куниин** (**E. Koonin**, США), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Ленин**, академик, 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 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.Черноустько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Мурманская ТЭЦ до сих пор работает на мазуте.
См. в номере: **З.И.Слуковский**. Греть, дымить и загрязнять: история мазута в России.

Фото Михаила Тихомирова

В НОМЕРЕ:

3 З.И.Слуковский

Греть, дымить и загрязнять: история мазута в России

В столице Заполярья — Мурманске — до сих пор продолжают использовать мазут в качестве основного топлива, которое загрязняет летучей золой с примесями ванадия и никеля городскую территорию и близлежащие водоемы.

12 Е.Н.Воропаева, Т.И.Поспелова, М.И.Воевода,
В.Н.Максимов

Потеря гетерозиготности и онкогенез

Утрата части генетической информации в отдельных клетках организма сопровождается потерей гетерозиготности. Такая нестабильность генома лежит в основе опухолевой прогрессии, т.е. увеличении степени злокачественности опухоли. Потеря гетерозиготности в гене *TP53*, который называют «дирижером ансамбля генов» противоопухолевой защиты организма, — общее свойство большого числа новообразований.

23 Э.М.Галимов

Изотопный состав железа VLT-базальта с «Луны-24» и происхождение Луны

Содержание изотопа ^{57}Fe в мантии Земли выше, чем в лунной. Это свидетельствует об обогащении ядра Земли легким изотопом ^{54}Fe , что согласуется с моделью формирования системы Земля—Луна путем фрагментации газопылевого облака.

31 О.Л.Савельева, Д.П.Савельев, С.В.Москалёва

Космогенные сферулы в океане

Значительная часть микроскопического космического вещества нагревается и плавится во время прохождения через атмосферу Земли, что приводит к образованию космогенных сферул с характерными, иногда очень красивыми структурами.

37 Г.Г.Матишов, О.В.Степаньян

Радиационная экологическая океанология

Радиационная экологическая океанология — новое научное направление в изучении Мирового океана. Оно возникло на стыке океанографии, радиационной биологии, экологии, морской биологии, гидробиологии и геоэкологии. В статье рассказывается об истории изучения радиоактивного загрязнения морских вод и показаны основные достижения последних лет.

46 С.В.Наугольных

Вековая история одной палеоботанической идеи

Ископаемые остатки листьев, похожие на *Glossopteris*, были найдены на территории России еще в середине XIX в. Как свидетельство в пользу связей древних континентов, они стали одним из оснований для организации В.П.Амалицким поисков пермских ящеров. Современные исследования показывают, что листья принадлежат иным растениям, не родственным глоссоптеридам, но это не отменяет флористических связей северных и южных континентов в позднепермскую эпоху.

57 А.М.Портнов

Алюминий везде... Где?

Россия снабжает «металлом современной цивилизации» большую часть Западной Европы. Крупнейший в мире Братский алюминиевый завод производит ежегодно более миллиона тонн этого металла.

66 ЗАМЕТКИ И НАБЛЮДЕНИЯ

И.А.Захаров

Генетика в московском дворе: насекомые разносят споры гриба, который меняет пол растения

71 ИСТОРИЯ НАУКИ

П.В.Квартальнов

Одюбон из Находки: жизнь Игоря Любимова

77 НОВЫЕ КНИГИ

CONTENTS:

3 Z.I.Slukovskii

To Heat, to Smoke, and to Pollute: the History of Mazut in Russia

In Murmansk, the capital of the Arctic region, mazut is still used oil as the main fuel, which pollutes the city's territory and nearby water-bodies with fly ash with admixtures of vanadium and nickel.

12 E.N.Voropaeva, T.I.Pospelova, M.I.Voevoda,
V.N.Maksimov

Loss of Heterozygosity and Oncogenesis

The loss of a part of the genetic information in individual cells of the body is accompanied by the loss of heterozygosity. This genome instability underlies tumor progression, i.e. an increase in the degree of tumor malignancy. Loss of heterozygosity in the gene *TP53*, which is called "the gene band director" of the antitumor defense of the organism, is a common property of a large number of neoplasms.

23 E.M.Galimov

Iron Isotopic Composition of Lunar VLT-Basalt and the Origin of the Moon

Content of ^{57}Fe isotope in the Earth's mantle is higher than in the lunar one. This witnesses the enrichment of the Earth's core with the light isotope ^{54}Fe , which is consistent with the model of the formation of the Earth–Moon system by fragmentation of a gas-dust cloud.

31 O.L.Savelyeva, D.P.Savelyev, S.V.Moskaleva

Cosmogenic Spherules in the Ocean

A significant part of microscopic cosmic material heats up and melts during its passage through the Earth's atmosphere, which leads to the formation of cosmogenic spherules with characteristic, sometimes very beautiful structures.

37 G.G.Matishov, O.V.Stepanyan

Radiation Environmental Oceanology

Radiation environmental oceanology is a new scientific research area in the study of the World Ocean. It arose at the interface of oceanography, radiation biology, ecology, marine biology, hydro-biology, and geoecology. The article presents the history of the study of radioactive pollution of sea waters and shows the main achievements of recent years.

46 S.V.Naugolnykh

Age-Long History of One Paleobotanical Idea

Fossil remains of leaves, similar to *Glossopteris*, were found in Russia in the middle of the 19th century. As evidence in favor of the connections of the ancient continents, they became one of the reasons for V.P.Amalitskii to conduct a search for Permian amphibians and reptiles. Modern studies show that these leaves belong to other plants, not related to glossopterids, but this does not cancel the floristic relationships between northern and southern continents in the Late Permian.

57 A.M.Portnov

Aluminum is Everywhere... Where?

Russia supplies most of the Western Europe with the "metal of modern civilization". The world's largest Bratsk Aluminum Smelter produces over a million tons of this metal annually.

66 NOTES AND OBSERVATIONS

I.A.Zakharov

Genetics in a Moscow Courtyard: Insects Spread Fungal Spores that Change the Sex of Plants

71 HISTORY OF SCIENCE

P.V.Kvartalnov

Audubon from Nakhodka: Life of Igor Lyubimov

77 NEW BOOKS

Греть, дымить и загрязнять: история мазута в России

З.И.Слуковский^{1,2}

¹Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (Апатиты, Россия)

²Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Россия)

Сегодня подавляющее большинство ТЭЦ в России работает, используя природный газ или уголь. Однако так было не всегда. Еще 20–30 лет назад существенную роль в энергетике нашей страны играли нефтепродукты, в том числе мазут. В статье изложена краткая история появления этого топлива в дореволюционное время в России и история его активного использования в СССР, в первую очередь для обеспечения городов и промышленных предприятий электроэнергией и теплом. Кроме того, приводятся примеры негативного влияния мазутных выбросов на окружающую среду. Главным образом это происходило и происходит из-за высоких концентраций ванадия и никеля в топочных мазутах. Описываются последствия длительной работы ТЭЦ в Карелии и Мурманской обл. на примере исследования донных отложений в малых городских озерах северо-западной части России.

Ключевые слова: мазут, тяжелые металлы, озера, Республика Карелия, Мурманск, Арктика.

Сегодня, наверное, даже ребенок младшего школьного возраста знает, что мы живем в нефтяную эпоху и каждый день сталкиваемся с вещами, созданными из нефти или функционирующими благодаря ей. Неудивительно, что цены на черное золото так волнуют всех россиян, ведь благосостояние нашей страны напрямую зависит от того, сколько этого сырья мы продадим другим государствам и, главное, сколько за это выучим. Однако существует и внутреннее потребление нефти и продуктов ее переработки. Один из них — мазут. О нем и его прямой связи с загрязнением окружающей среды северных городов России я и расскажу подробнее.

Недооцененные «отбросы»

Мазут — вязкое жидкое топливо темно-коричневого цвета, представляющее собой остаток после выпадения из нефти в процессе переработки бензиновых, керосиновых и газойлевых фракций [1]. Слово «мазут» происходит от турецкого *mazot* и араб-



Захар Иванович Слуковский, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН и Института геологии Карельского научного центра РАН. Область научных интересов — экологическая геохимия, геоэкология, палеолимнология, биогеохимия, биоиндикация. Неоднократно публиковался в «Природе». e-mail: slukovsky87@gmail.com

ского *mahzūlat*, что означает «отбросы» или «отходы». Основная область применения мазута связана с деятельностью предприятий энергетики — котельных, тепловых электростанций (ТЭС) и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), где мазут используется в качестве топлива [1, 2]. Кроме того, мазут применяется для получения смазочных масел, кокса, битумов, моторного топлива. Но основное его использование все же связано с получением тепла и электроэнергии. В России и в некоторых странах бывшего СССР технические характеристики мазута регламентирует ГОСТ 10585-2013 «Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия». Именно в этом документе официально закреплены такие понятия,

как «топочный мазут», применяемый на предприятиях энергоблока, и «флотский мазут», используемый на кораблях. Самые популярные марки мазута — М40 и М100 (топочные) и Ф5 и Ф12 (флотские). Их отличия связаны с основными физико-химическими параметрами топлива — вязкостью, влажностью, зольностью, массовой долей серы и различных примесей.

Нефть, как полезное сырье, известна человеку давно, однако настоящая нефтяная эпоха началась ближе к середине XIX в., и во многом она связана с использованием не сырой, а переработанной нефти. Один из первых заводов по ее перегонке был организован в 1823 г. на юге России братьями Василием, Герасимом и Макаром Дубининскими. Производя различные продукты перегонки нефти для аптечных и осветительных целей, в качестве остатка они получали мазут. Однако о его использовании в то время речи не шло [3]. Даже с началом активного производства керосина в России к концу 1850-х годов мазут по-прежнему выбрасывали за ненадобностью. Это при том, что из 40 ведер нефти получалось аж 20 ведер мазута и лишь 16 — керосина. Значительную часть мазута безбожно выливали в озера (обязательно вспомним об этом ближе к концу статьи!) и в специально вырытые пруды [3].

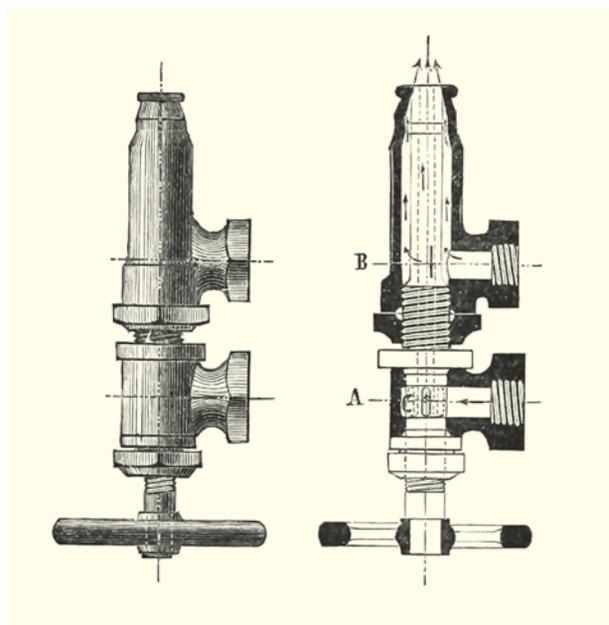


Рис.1. «Внешний вид и разрез нефтяной форсунки инженера Шухова (1881 г.), действующей водяным паром. Размер в 3 раза меньше натуре. Через А в центральную трубку входят нефтяные остатки, через В пар из паровика. Исправное действие удостоверяется многолетним применением на множестве топок» (рисунки 53 и 54 на с.169 книги Д.И.Менделеева «Основы фабрично-заводской промышленности», 1897).

Главной проблемой была густая консистенция мазута, из-за чего он плохо горел. В 1866 г. инженер и изобретатель А.И.Шпаковский придумал пульверизатор для подачи жидкого топлива, а чуть позже, в 1880 г., другой русский инженер — В.Г.Шухов — изобрел специальную форсунку (рис.1), в которой вытекающее по узкому каналу топливо силой водяного пара превращалось в мельчайшую пыль. Эта пыль, попадая в камеру сгорания, испарялась, смешивалась с воздухом и хорошо сгорала [4].

В первую очередь новое топливо стали активно использовать на судах, где оно частично заменило неэкономичный и грязный во всех отношениях уголь. Уже в конце 1870-х годов Людвиг Нобель (брат известного на весь мир Альфреда Нобеля) приобрел у Шухова патент на производство его форсунки и внедрил ее в двигатели нефтяных танкеров, а ближе к концу XIX в. мазут стал широко применяться в качестве топлива на заводах и фабриках. В общем, форсунка Шухова оказалась настолько удачной, что ее изображение даже попало на обложку книги Д.И.Менделеева «Основы фабрично-заводской промышленности» (1897). И это не случайно. Дмитрий Иванович был одним из идеологов практического использования мазута, а посему высоко оценил изобретение Шухова.

Дайте Северу тепло!

Россия — страна северная. Зима в отдельных регионах, особенно тех, которые входят в Арктическую зону РФ, может длиться до полугода и даже дольше. Это означает, что развитие городских территорий и промышленности в условиях сурового климата возможно только при достаточном обогреве в зимний период. Одним из вариантов было и остается строительство и использование котельных, ТЭС и ТЭЦ, на которых и стал использоваться мазут, наряду с углем и реже — с торфом.

Особенно активно строительство новых предприятий энергоблока началось с приходом советской власти, в 1930-е годы [5]. Основным импульсом этого процесса послужил государственный план по электрификации страны (ГОЭРЛО) от 1920 г., принятый Советом народных комиссаров. Согласно ему, на нужды жителей городов и промышленных предприятий были запущены ТЭЦ в Петрограде, Пскове, Казани, Самаре, Царицыне, Ростове-на-Дону и в крупных городах нынешней Украины. Лишь к 1960-м годам на многих ТЭЦ вместо мазута стал применяться природный газ, что напрямую связано с разведкой и разработкой его крупных месторождений. Однако еще в 1970-х



Рис.2. Вид на Мурманск и дымящие трубы ТЭЦ.

Фото автора

годах мазут составлял около 30% в общем балансе советских предприятий энергоблока, в том числе тех, которые обогревали наши северные города*. Например, в моем родном Петрозаводске ТЭЦ, введенная в эксплуатацию в 1976 г., до начала 2000-х годов (около 20 лет) работала исключительно на мазуте и лишь потом перешла на природный газ. В Архангельске ТЭЦ работала на мазуте с начала 1970-х до 2012 г. (40 лет), затем также стала использовать газ. В Вологде местная ТЭЦ перешла на газ в 1995 г., проработав на мазуте почти 40 лет. Мурманская ТЭЦ, введенная в начале 1930-х годов, до 1960-х работала на угле, а позже перешла на мазут и до сих пор (почти 60 лет) работает, используя именно этот вид топлива (рис.2). Как вы понимаете, из всех перечисленных городов Севера, только в столице Заполярья мазут продолжают использовать в качестве основного топлива, в остальных же городах перешли на природный газ.

На сегодняшний день доля нефтепродуктов (в том числе мазута) в функционировании российских предприятий электроэнергетики составляет не более 3%. Основное топливо (около 73%), благодаря обширной газификации, — природный газ,

на втором месте — уголь**. На угле работали и продолжают работать в основном ТЭС и ТЭЦ Сибири, где используется местное сырье. Следует добавить, что совсем недавно мазут начал сдавать свои позиции и как судовое топливо. В 2020 г. Международной морской организацией (ИМО) были введены новые правила, нацеленные на снижение выбросов серы в Мировой океан***. По ГОСТу 10585-2013, концентрация серы во флотском мазуте Ф5 не должна превышать 1.5%, но новые международные правила требуют не более 0.5%. В общем, пора обратиться к химии мазута. Даже его полное исчезновение из нашей жизни (к чему все так или иначе идет) не позволит забыть о нем в виду особенностей состава и, как следствие, специфички влияния на окружающую среду.

Из почвы в воду

Состав мазута напрямую определяется составом нефти. Кроме серы, о которой было сказано вы-

* Фомичева А., Скорлыгина Н., Барсуков Ю. Мазут выходит из резервов. Коммерсантъ. 2016. www.kommersant.ru/doc/2902208.

** Отчет о функционировании электроэнергетики за 2016 год (предварительный). Российское энергетическое агентство Минэнерго России. М., 2017. www.bigpowernews.ru/photos/0/0_CXq7NsBUWeunnVlogf7uolVy4SB2XcBA.pdf

*** Барсуков Ю., Веденева А., Смертина П. 50 оттенков серы. Коммерсантъ. 2019. <https://www.kommersant.ru/doc/4173645>.



Рис.3. Цистерна с мазутом.

Фото: трансавтоцистерна.рф

ше, из нефти в продукты ее переработки попадают еще два химических элемента, важных с точки зрения экологических исследований, — ванадий и никель. В нефти Западной Сибири концентрация ванадия варьирует от 1 до 58 мг/кг, а никеля — от 5 до 15 мг/кг [6]. Наряду с железом они — самые распространенные примеси и в продуктах переработки нефти, включая тяжелые нефтяные фракции — гудрон, кокс и мазут (рис.3). Эти примесные металлы преимущественно концентрируются в золе мазута. Например, содержание оксидов ванадия может составлять до 50% от массы всей

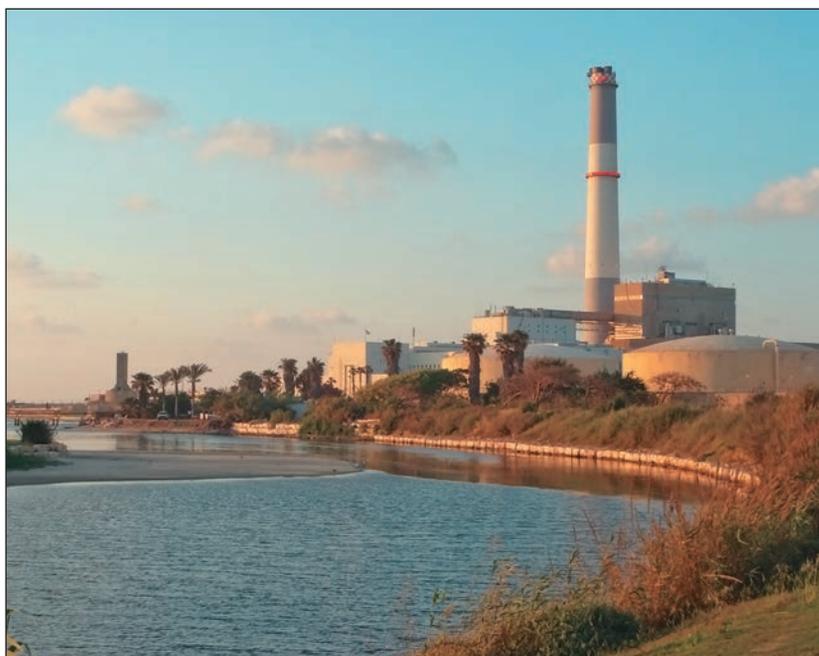


Рис.4. Электростанция «Рединг» (Тель-Авив, Израиль).

Фото Israel Travel Guide, CC BY-SA 3.0

зола [1], но в среднем эти значения составляют 6–12%. Среднее содержание никеля в золах топочного мазута 3–4% [7]. Остальные тяжелые металлы в мазутной золе представлены в гораздо меньших количествах. Высокими концентрациями ванадия и никеля характеризуются в основном высокосернистые мазуты, тогда как в сырье с малым содержанием серы металлические примеси (особенно ванадий) часто имеют следовые количества [1].

Летучая зола, образующаяся при сжигании мазута, — основная проблема для окружающей среды городов и близлежащих территорий. Именно благодаря золе ванадий и никель мигрируют от ТЭЦ в природные объекты транзитом через атмосферный воздух. Дальность выбросов мазутных ТЭЦ в зависимости от высоты труб, господствующих ветров в регионе и размеров зольных частиц может достигать 15 км [7]. Например, повышенные относительно фона концентрации ванадия и никеля в почве Тель-Авива прослеживались на расстоянии до 7.5 км от электростанции «Рединг», работавшей на мазуте с конца 1930-х годов до 2006 г. (рис.4). В конце 1980-х годов в непосредственной близости

от предприятия концентрация ванадия и никеля относительно чистых верхних горизонтов почв увеличилась в 13 раз [8]. В мексиканском городе Саламанка (штат Гуанахуато) повышенное содержание ванадия (600 мг/кг) также связано с выбросами ТЭЦ, работающей на мазуте. Однако за городом, т.е. на условно фоновой территории, содержание этого металла в почве колебалось от 11 до 126 мг/кг и было связано в основном с природными факторами [8]. Хуже то, что повышенные концентрации ванадия в почвах Саламанки повлияли и на химический состав подземных вод, исследованных в зоне действия предприятия. В них были определены двукратные превышения этого металла по сравнению со средним фоновым значением, рассчитанным для удаленных от

города условно чистых районов [9]. В целом в зонах влияния мазутных ТЭЦ концентрации ванадия (как главного индикатора их деятельности) обычно в 7–10 раз превышают его фоновый уровень [7]. В данном случае речь идет о почвах городов и близлежащих территорий. Я же предлагаю теперь поговорить о донных отложениях озер. Именно по этим объектам благодаря маркерным элементам можно оценить степень влияния того или иного источника антропогенных выбросов на окружающую среду и определить динамику ретроспективных преобразований*. Давайте из теплых Израиля и Мексики снова вернемся на наш родной российский Север — в Карелию и Мурманскую область.

Положительная динамика

Выше я отмечал, что и в Петрозаводске, и в Мурманске на благо промышленных предприятий и городских жителей действуют ТЭЦ. Правда, в столице Карелии предприятие встало на газовый путь экологического исправления почти 20 лет назад, а вот столица Заполярья до сих пор загрязняется летучей золой со всеми ее примесями в виде ванадия и никеля. Посмотрим на графики их распределения в современных донных отложениях малого городского оз.Ламба (рис.5). Учитывая тесное соседство водоема и Петрозаводской ТЭЦ (около 1 км) и то, что наибольшему загрязнению обычно подвержены районы, прилегающие к источникам выбросов, мы не должны удивляться поистине гигантским концентрациям металлов на дне озера. Для ванадия максимум составляет 4785, а для никеля — 607 мг/кг. Известно, что в верхних горизонтах почвы на территориях, прилегающих к мазутной теплоэлектростанции, содержание ванадия может варьировать от 2090 до 7010 мг/кг [10]. Как видно, ванадиевые аномалии оз.Ламба вполне уместаются в этот диапа-

зон концентраций. В самых верхних слоях озера наблюдается тенденция снижения поступления тяжелых металлов в городской водоем, что вызвано переходом ТЭЦ на природный газ. В более широком интервале верхних (т.е. наиболее современных) слоев осадков содержания ванадия и никеля все равно остаются значительно выше их доиндустриального уровня. Этому можно дать два объяснения, не исключая друг друга. Во-первых, мазут — резервное топливо Петрозаводской ТЭЦ. Значит, его использование в той или иной степени сохраняется. Во-вторых, загрязнители постоянно поступают в озеро из почвенного покрова вблизи водоема. Таким образом, сейчас полного снижения концентраций ванадия до фонового уровня не предвидится. И вероятно, еще очень долго. Но в любом случае существующая динамика говорит о заметном улучшении экологического состояния городского озера и всей близлежащей территории.

Кроме Ламбы загрязнению ванадием и никелем подвержены также озера Четырехверстное, расположенное в 10.5 км от ТЭЦ, и Денное, нахо-

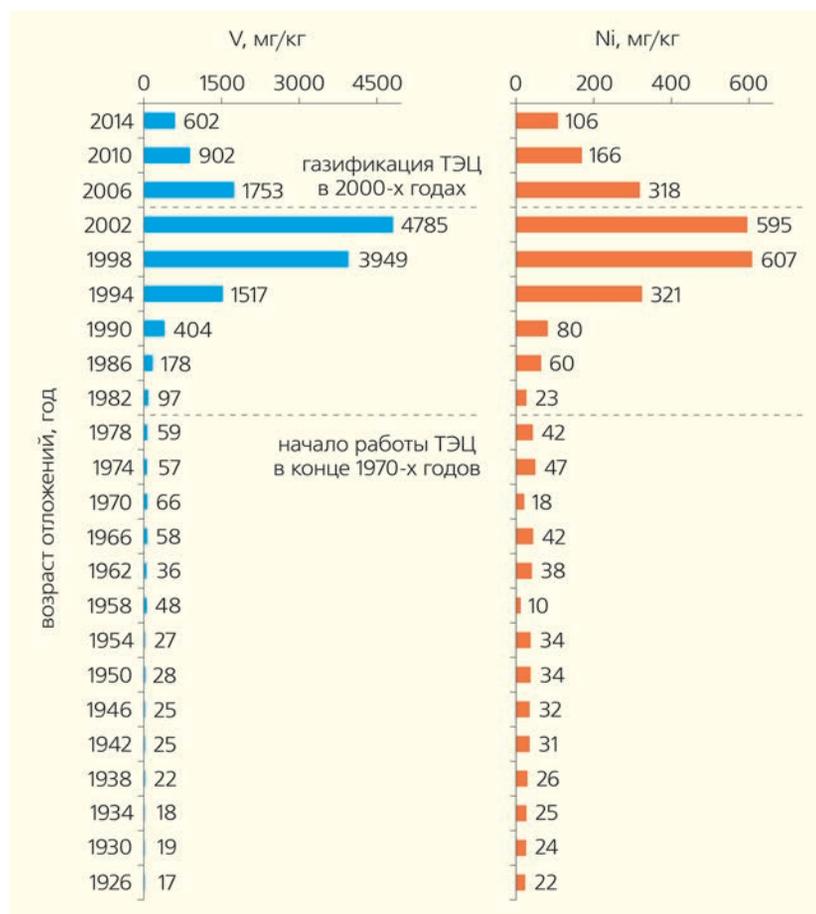


Рис.5. Вертикальное распределение ванадия и никеля в донных отложениях оз.Ламба (Петрозаводск, Карелия) с учетом возраста осадков.

* Слукровский З.И. Сантиметры истории, или Как тяжелые металлы маркируют события промышленного века в отдельно взятом водоеме // Природа. 2018. №7. С.29–35.

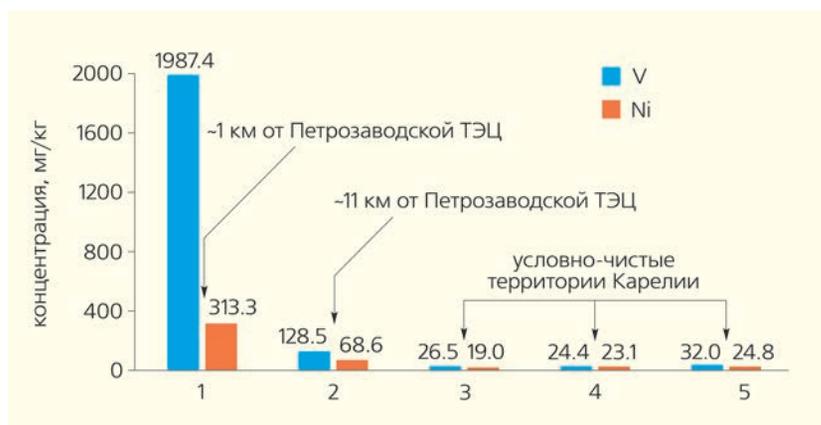


Рис.6. Средние концентрации ванадия и никеля в верхних (0–15 см) слоях донных отложений малых озер Карелии. 1 — оз.Ламба (Петрозаводск), 2 — оз.Четырехверстное (Петрозаводск), 3 — оз.Денное (Прионежский район Карелии), 4 — оз.Мишкино (Прионежский район Карелии), 5 — фон для юга Карелии.

дающееся чуть ближе — в 7 км от предприятия, но уже за городской чертой, среди леса. В донных отложениях обоих малых озер отмечается схожая с оз.Ламба динамика поступления изучаемых тяжелых металлов. Однако и в Четырехверстном, и в Денном уровень их накопления существенно ниже. Это хорошо видно на другом графике (рис.6), где показаны средние содержания тяжелых металлов в верхнем (15 см) слое донных отложений этих озер и еще оз.Мишкино, расположенного в 100 км от Петрозаводска. Очевидно, водные объекты города представляют собой более плачевную картину по загрязнению, в отличие от озер, находящихся вне урбанизированной среды. Фон ванадия и никеля в донных отложениях малых озер юга Карелии составляет 32 и 24.8 мг/кг

соответственно [11]. И так, концентрации этих металлов в осадках озер Денного и Мишкина ниже или находятся на уровне естественного содержания в природе. Кстати, фоновое содержание никеля в донных отложениях континентальных озер Сибири (28 мг/кг) близко к его значению для малых озер Карелии [12], а вот аналогичная величина по ванадию (61 мг/кг) — в два раза выше. Как ни крути, природную геохимическую специфику каждого региона никто не отменял. Даже в пределах Республики Карелия содержание ванадия в доиндустриальных слоях донных отложений озер варьирует от 2 до 160 мг/кг [11]. Самые высокие его концентрации, кстати, приурочены к районам развития ванадиевых рудопроявлений северного региона. Так что не только воздействие ТЭЦ, но и другие факторы влияют на химическое состояние окружающей среды Карелии.

Мазутный форпост Арктики

В городе-герое Мурманске в структуру ТЭЦ входят три крупных объекта: центральная ТЭЦ и две котельные («Южная» и «Восточная»). Если вспомнить о допустимой зоне охвата воздействия ТЭЦ на окружающую среду в 15 км, то столица Заполярья практически полностью находится в такой зоне, поэтому неудивительно, что загрязнением

ванадием и никелем характеризуются донные отложения всех изученных нами озер Мурманска [13]. Самые высокие накопления этих тяжелых металлов выявлены в озерах Семеновском, Среднем и Ледовом, которые практически одинаково близко расположены и к центральной ТЭЦ Мурманска, и к котельной «Восточная». Однако и другие водоемы испытывают существенную нагрузку (рис.7), причем это относится даже к оз.Треугольному, которое находится на другой стороне Кольского залива Баренцева моря, разделяющего Мурманск на две части. Изначально мы планировали исполь-

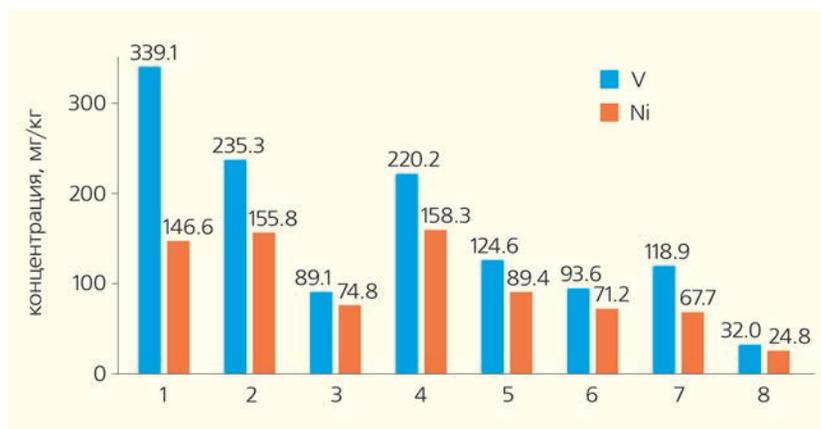


Рис.7. Средние концентрации ванадия и никеля в верхних (0–15 см) слоях донных отложений малых озер Карелии. 1 — оз.Семеновское, 2 — оз.Среднее, 3 — оз.Окуневое, 4 — оз.Ледовое, 5 — оз.Южное, 6 — оз.Северное, 7 — оз.Треугольное, 8 — фон для юга Карелии.

зовать этот водоем в качестве фонового, но проведенные исследования вынудили нас искать другой объект, удаленный на большее расстояние от главного источника загрязнения города.

Еще во время отбора проб мы заметили, что в большинстве мурманских озер донные отложения имеют специфический запах нефтепродуктов*. Это дополнительно подтверждает влияние мазутного загрязнения городских водоемов. Проведенные позже исследования валового содержания нефтепродуктов в наших озерных осадках показали, что и ими «богаты» несчастные городские водоемы. В целом вы, думаю, уже поняли (вернее, должны были вспомнить): хоть на заре мазутной эры, хоть на ее закате, судьба у этого вида топлива одна — быть на дне водоемов.

Вот только если в середине XIX в. под мазут специально вырывали пруды, то сейчас его летучей золой покрываются естественные водоемы, которые постоянно используются людьми в рекреационных целях. Например, на оз.Семеновском зимой регулярно можно видеть рыбаков. Один из них даже как-то во время наших полевых работ в 2019 г. (рис.8) поведал о прекрасных щуках и кумже, которых он ловил, ловит и будет ловить в озере**. С экологической обстановкой, в его понимании, в Мурманске все нормально. Но, увы, цифры говорят все-таки об обратном.

Водоемы Мурманска, которые мы изучали, продолжают накапливать вредные выбросы ТЭЦ, что хорошо видно на графиках вертикального распределения ванадия и никеля в колонках современных донных отложений озер Семеновского и Окуневого (рис.9, 10). Аналогичная картина получается и по другим объектам. Обобщив все данные, можно заключить, что ванадием и никелем в отложениях озер заражены слои мощностью от 5 до 25 см. Это довольно много, учитывая площади некоторых водоемов и непрекращающийся характер вредных выбросов. Так что, несмотря на всеобщий отказ от мазута как топлива для ТЭЦ (не только в России,



Рис.8. Отбор проб донных отложений на оз.Семеновском (Мурманск) весной 2019 г.
Фото автора

но и по всему миру), крупнейший город Заполярья остается своеобразным форпостом, не позволяющим экологам забыть о мазуте навсегда. Однако решить эту проблему пока практически невозможно: газификация Мурманска и всей области — дело, вероятно, какого-то совсем далекого будущего. Поэтому хоть и дорог мазут, и неэкологичен, но отказаться от него в регионе не способны.

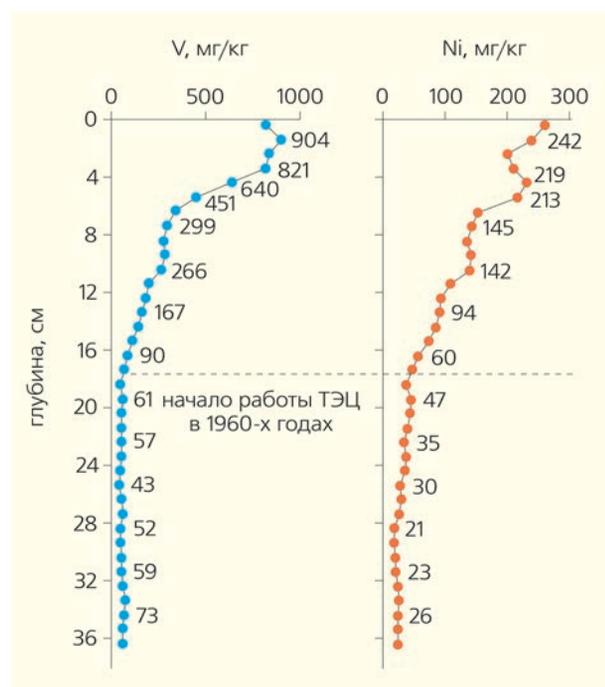


Рис.9. Вертикальное распределение концентраций ванадия и никеля в донных отложениях оз.Семеновского, Мурманск.

* Слукровский З. Озера с запашком. Интернет-журнал «Лицей». 2018. <https://gazeta-licey.ru/science/70274-ozyora-s-zapashkom>.

** Слукровский З. В тихом озере черт-те что водится. Мурманский вестник. 2019. www.mvestnik.ru/eco/v-tihom-ozere-chrt-te-cto-voditsya.

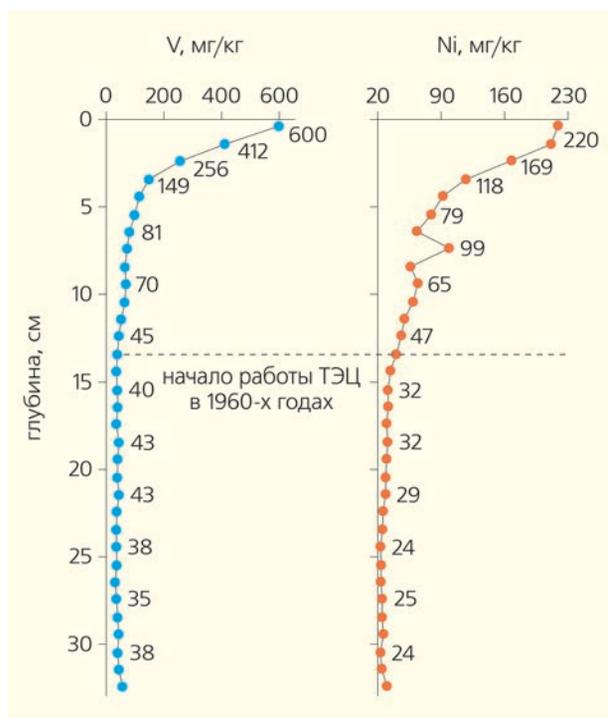


Рис.10. Вертикальное распределение концентраций ванадия и никеля в донных отложениях оз.Окуневого, Мурманск.

В ГОСТах не значатся

Ежегодное потребление мазута на Мурманской ТЭЦ доходит до 1 млн т*. Естественно, это полностью привозной продукт, так как Мурманская обл. не относится к нефтедобывающим регионам. Из-за колебаний цен на мазут местным властям периодически приходится просить помощи федерального центра на закупку топлива, а производителям тепла — повышать тарифы для населения. Получается, что мазут для Арктического региона — головная боль во всех отношениях: и экологических, и экономических, и даже репутационно-политических. В связи с этим следует отметить, что кроме Мурманска мазут используется в теплоснабжении и других городов области. Например, на нем работают котельные в Полярных Зорях, Кандалакше и Североморске, а также ТЭЦ в Ковдоре и Мончегорске [14]. Кстати, именно из-за выбросов ТЭЦ в донных отложениях малого оз.Комсомольского,

расположенного в центре Мончегорска, мы с коллегами также зафиксировали повышенные по сравнению с фоновыми концентрации ванадия (до 120 мг/кг) [15]. Про связь никеля в осадках и ТЭЦ говорить сложно, так как основным его источником в данном случае выступают выбросы металлургического комбината.

Мазут, хоть и не так, как раньше, востребован до сих пор. В связи с этим очень странно, что, несмотря на его вредные примеси, ГОСТ 10585-2013 регламентирует лишь содержание серы, полностью игнорируя железо, ванадий и никель. Особенно два последних элемента. Деление топочных мазутов, например, на низко- и высокованадиевые, могло бы позволить допускать к использованию только то топливо, в котором концентрации тяжелых металлов наименее опасны для окружающей среды. То же самое можно сделать и по никелю. Вот только кто будет этим заниматься?! С нормативами у нас в стране вообще большие проблемы. Как не вспомнить, что в России до сих пор не разработан ГОСТ, регламентирующий предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер и рек? Вы, вероятно, обратили внимание, что в своих исследованиях городских озер нам постоянно приходится обращаться к фоновому содержанию того или иного элемента. Во многом это связано с отсутствием альтернативы, которую можно было бы использовать, оценивая загрязненность водоемов тяжелыми металлами. Иногда в качестве такой альтернативы используют почвенный ГОСТ, иногда среднее содержание элементов в земной коре или в осадочных породах планеты. Однако все эти варианты вряд ли устроят воображаемого госинспектора по экологии, который решит оценить описанные выводы по загрязнению озер Карелии и Мурманской обл. и наложить на предприятия штрафы. Донные отложения нужно сравнивать с донными отложениями, а наши фоновые концентрации пока не имеют статуса, закрепленного на официальном уровне. Таким образом, мазут и, следовательно, выбросы мазутных ТЭЦ практически неуязвимы с экологической точки зрения. Хорошо хоть, за серу во флотском мазуте взялись. Правда, лишь на международном (не российском!) уровне. Топочный же мазут, если и уйдет из Заполярья, то, вероятно, по каким-нибудь другим причинам. ■

* Попов А. Три факта о Мурманской ТЭЦ // Кислород. Life. 2019. https://kislород.life/keysy/tri_fakta_o_murmanskoj_tets/

Автор искренне благодарен своим коллегам Д.Б.Денисову, А.В.Гузовой, М.А.Медведеву, Д.Г.Новицкому, Е.В.Сыроежко и А.А.Черепанову за помощь в отборе проб донных отложений озер, А.С.Парамонову, В.Л.Утициной и М.В.Эховой — за качественное проведение аналитических исследований, а также В.А.Даувальтеру — за постоянное обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-05-00897 «а») – в части изучения озер Карелии и Российского научного фонда (проект 19-77-10007) – в части изучения озер Мурманска и анализа научной литературы по влиянию ТЭЦ на природную среду.

Литература / References

1. Геллер З.И. Мазут как топливо. М., 1965. [*Geller Z.I. Fuel oil as fuel. Moscow, 1965. (In Russ.)*.]
2. Мутугуллина И.А. Пути решения проблем при использовании мазута. Вестник казанского технологического университета. 2012; 15(10): 369–371. [*Mutugullina I.A. Ways to solve problems when using fuel oil. Bulletin of Kazan Technological University. 2012; 15(10): 369–371. (In Russ.)*.]
3. Энергетика: история, настоящее и будущее. Т.1. От огня и воды к электричеству. Киев, 2005. [*Energy: history, present and future. Part 1. From fire and water to electricity. Kiev, 2015. (In Russ.)*.]
4. Моторные, реактивные и ракетные топлива. М., 1962. [*Motor, jet and rocket fuels. Moscow, 1962. (In Russ.)*.]
5. Орлов А.И. Русская отопительно-вентиляционная техника. М., 1950. [*Orlov A.I. Russian heating and ventilation equipment. Moscow, 1950. (In Russ.)*.]
6. Справочник по геохимии нефти и газа. СПб., 1998. [*Handbook of geochemistry of oil and gas. Sankt Petersburg, 1999. (In Russ.)*.]
7. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М., 1990. [*Saet J.E., Revich B.A., Janin E.P. Environment geochemistry. Moscow, 1990. (In Russ.)*.]
8. Ganor E., Altshuller S., Foner H.A. et al. Vanadium and nickel in dustfall as indicators of power plant pollution. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1988; 42: 241–252.
9. Hernandez H., Rodriguez R. Geochemical evidence for the origin of vanadium in an urban environment. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2002; 184(9): 5327–5342. DOI:10.1007/s10661-011-2343-9.
10. Mejia J.A., Rodriguez R., Armenta A. Aquifer Vulnerability Zoning, an Indicator of Atmospheric Pollutants Input? Vanadium in the Salamanca Aquifer, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2007; 185: 95–100. DOI:10.1007/s11270-007-9433-x.
11. Slukovskii Z.I. Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia. *Vestnik MSTU*. 2020; 23: 80–92. DOI:10.21443/1560-9278-2020-23-1-80-92.
12. Страховенко В.Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: дис. ... д-ра геолого-минерал. наук: 25.00.09. Новосибирск, 2011. [*Strakhovenko V.D. Geochemistry of sediments of the small continental lakes of Siberia. Ph.D. Thesis. Novosibirsk, 2011. (In Russ.)*.]
13. Slukovskii Z., Dauvalter V., Guzeva A. et al. The Hydrochemistry and Recent Sediment Geochemistry of Small Lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia. *Water*. 2020; 12: 1130. DOI:10.3390/w12041130.
14. Минин В.А. Теплоснабжение городов Мурманской области. Труды Кольского научного центра РАН. 2014; 3 (22): 68–76. [*Minin V.A. Heat supply of the cities of the Murmansk region. Proceedings of the Kola Science Center RAS. 2014; 3 (22): 68–76. (In Russ.)*.]
15. Slukovskii Z.I., Dauvalter V.A., Denisov D.B. et al. Geochemistry features of sediments of small urban arctic Lake Komsomolskoye, Murmansk region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 467: 012004. DOI:10.1088/1755-1315/467/1/012004.

To Heat, to Smoke, and to Pollute: the History of Mazut In Russia

Z.I.Slukovskii^{1,2}

¹Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center, RAS (Apatity, Russia)

²Institute of Geology, Karelian Research Centre, RAS (Petrozavodsk, Russia)

Nowadays, the vast majority of thermal power plants in Russia use natural gas or coal, however this has not always been like that. Only 20–30 years ago, a significant role in the energy sector of our country was played by oil products, including fuel oil. The article gives a brief history of the appearance of this fuel in pre-revolutionary times in Russia and a history of its active use in the USSR, mostly for providing cities and industrial enterprises with electricity and heat. In addition, examples of negative impact of emissions of fuel oiled thermal power plants on the environment are given. Mostly, this impact is due to the high concentrations of vanadium and nickel in mazut. The consequences of the long-term operation of the thermal power plants in the Republic of Karelia and Murmansk oblast are described on the example of the study of sediments of small urban lakes in the northwestern part of Russia.

Keywords: fuel oil, mazut, heavy metals, lakes, Republic of Karelia, Murmansk, Arctic.

Потеря гетерозиготности и онкогенез

Е.Н.Воропаева¹, Т.И.Поспелова², М.И.Воевода¹, В.Н.Максимов¹

¹Научно-исследовательский институт терапии и профилактической медицины — филиал Федерального исследовательского центра «Институт цитологии и генетики» СО РАН (Новосибирск, Россия)

²Новосибирский государственный медицинский университет Минздрава РФ (Новосибирск, Россия)

Утрата части генетической информации — трагическое событие в жизни эукариотической клетки. Степень его опасности зависит от того, на какой стадии индивидуального развития организма (онтогенеза) оно произошло, а также генного состава и размера утраченного участка. Так, потери (делеции) участков хромосом в период развития эмбриона становятся причиной его гибели либо приводят к рождению детей с наследственными синдромами нарушения развития, а при утрате целой неполовой хромосомы (моносомии) эмбрион и вовсе не может начать развиваться. Позднее, на любом из последующих этапов онтогенеза, также может происходить утрата части генетической информации в отдельных клетках организма, которая сопровождается потерей гетерозиготности. Под этим понимают уменьшение изменчивости в участках генома, для которых исходно был характерен полиморфизм. Такая нестабильность генома лежит в основе опухолевой прогрессии — генетически закрепленного, наследуемого опухолевой клеткой и необратимого изменения одного или нескольких ее свойств. Важно понимать, что, однажды возникнув, генетическая нестабильность склонна прогрессировать: на первых этапах опухолевого роста медленно, а затем быстро нарастая. На тканевом, органном и организменном уровне это сопровождается увеличением степени злокачественности опухоли. Общим свойством большого числа новообразований является потеря гетерозиготности в гене *TP53*, который называют «дирижером ансамбля генов» противоопухолевой защиты организма.

Ключевые слова: потеря гетерозиготности, онкогенез, опухолевая прогрессия, репарация ДНК, ген *TP53*, лимфомы.

Многим известна детская книга А.С.Некрасова «Приключения капитана Врунгеля», в которой он рассказывает о кругосветном путешествии главных героев на двухместной парусной яхте «ПОБЕДА». В результате аварии на старте были сбиты две первые буквы названия судна, в результате чего оно стало именоваться «БЕДА». Обнаружив это, доблестный капитан воскликнул: «Скандал! Непоправимый скандал!». Он предчувствовал, что такое изменение в названии яхты может напрямую отразиться на судьбе корабля. К счастью, главные герои книги удачно завершили свое полное опасных приключений путешествие, однако так бывает не всегда.

Утрата части генетической информации — трагическое событие в жизни эукариотической клетки. Степень его опасности зависит от того, на какой стадии индивидуального развития организма (онтогенеза) оно произошло, а также генного состава и размера утраченного участка. Так, потери (делеции) участка хромосомы в период развития эмбриона становятся причиной его гибели либо приводят к рождению детей с наследственными синдромами нарушения развития, а при моносо-

мии, т.е. при отсутствии целой хромосомы, эмбрион и вовсе не может начать развиваться. Позднее, на любом из последующих этапов онтогенеза, также может происходить утрата части генетической информации в отдельных клетках организма, которая сопровождается таким явлением, как потеря гетерозиготности.

Напомним, что в соматических клетках человека в норме содержится двойной набор хромосом, один из которых получен от матери, а второй — от отца. На каждой паре хромосом есть соответствующие парные участки, называемые аллелями. Если два аллеля одинаковые, организм гомозиготный, если разные — гетерозиготный.

Установлено, что наиболее распространенный тип варибельности генома — однобуквенные замены (однонуклеотидные полиморфизмы), плотность, которых приблизительно 1 полиморфизм на 300 пар нуклеотидов (п.н.). Генетические различия между людьми составляют в среднем 1 нуклеотид из 1000 п.н. Если брать в расчет только кодирующие белок участки генов (всего около 1.5–2% генома), то каждый человек гетерозиготен минимум по 6–10 тыс. позиций [1].



Елена Николаевна Воропаева, доктор медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований терапевтических заболеваний НИИ терапии и профилактической медицины (НИИТГПМ) Института цитологии и генетики СО РАН. Специалист в области молекулярно-генетических механизмов опухолевой прогрессии гемобластозов, ведет разработку доказательных основ персонализированной терапии злокачественных лимфом.
e-mail: vena.81@mail.ru.



Татьяна Ивановна Поспелова, профессор, доктор медицинских наук, заведующая кафедрой терапии, гематологии и трансфузиологии Новосибирского государственного медицинского университета Минздрава РФ. Занимается изучением проблем множественной лекарственной устойчивости у больных опухолевыми заболеваниями крови, оценкой влияния типов метаболизма на переносимость полихимиотерапии, разработкой вопросов реабилитации пациентов после химиолучевой терапии.
e-mail: post_gem@mail.ru.



Владимир Николаевич Максимов, профессор, доктор медицинских наук, заведующий лабораторией молекулярно-генетических исследований терапевтических заболеваний НИИТГПМ. Научные интересы связаны с изучением молекулярно-генетических основ мультифакториальных и наследственных заболеваний.
e-mail: medik11@mail.ru.



Михаил Иванович Воевода, академик РАН, доктор медицинских наук, руководитель научного направления фундаментальных и клинических исследований НИИТГПМ. Область научных интересов — молекулярно-эпидемиологическая характеристика разнообразия генофонда населения Северной и Центральной Азии, эволюция генофондов древних и современных этнических групп Северной Азии, разработка методов молекулярно-генетического анализа вариабельности генома человека.
e-mail: mvoevoda@ya.ru.

Продвигаясь по клеточному циклу, клетка проходит ряд контрольных точек, в каждой из которых проверяется постоянство генома. Так, цель контрольной точки перехода из пресинтетической фазы в синтетическую — не допустить к делению клетки с поврежденной ДНК. На выходе из синтетической фазы проверяется полнота удвоения (репликации) генетического материала. Еще одну проверку на полноту репликации и повреждения ДНК клетка проходит в контрольной точке входа в митоз. Наконец, оценка связи всех хромосом с веретеном деления происходит перед переходом в анафазу, что необходимо для обеспечения равномерного распределения генетического материала между двумя дочерними клетками. При обнаружении нарушений на любом из этих этапов клеточный цикл должен быть остановлен, а повреждения устранены. В случае же невозможности репарации повреждений в клетке запускается апоптоз.

Проявлениями генетической нестабильности в опухоли могут быть утрата/добавление целых хромосом (анэуплоидия), а также потеря (делеция), преумножение (амплификация) или перенос (транслокация) отдельных хромосомных участков. Могут возникать нарушения в поддержании числа микросателлитных повторов (микросателлитная нестабильность), мутации отдельных нуклеотидов (вставки, делеции или замены), а также эпигенетические изменения (нарушение рисунка метилирования, мо-

дификация гистонов, спектра экспрессируемых микро-РНК и т.д.). Часть из этих нарушений служит причиной потери гетерозитности [2].

На рис.1 представлен круговой график комплекса соматических нарушений, выявленных в геноме единичной меланомной (рак кожи) клетки, свидетельствующий о том, что в результате генетической нестабильности в опухоли не только происходит накопление тысяч однонуклеотидных замен, сотен ма-

Неспособность клетки поддерживать постоянство своего генома (генетическая нестабильность) приводит к изменениям на различных уровнях организации наследственного материала.

Важное проявление генетической нестабильности — потеря гетерозиготности, под которой понимают уменьшение изменчивости в участках генома, для которых исходно был характерен полиморфизм.

Нарушения в поддержании числа микросателлитных повторов (микросателлитная нестабильность), мутации отдельных нуклеотидов (вставки, делеции или замены), а также эпигенетические изменения (нарушение рисунка метилирования, мо-

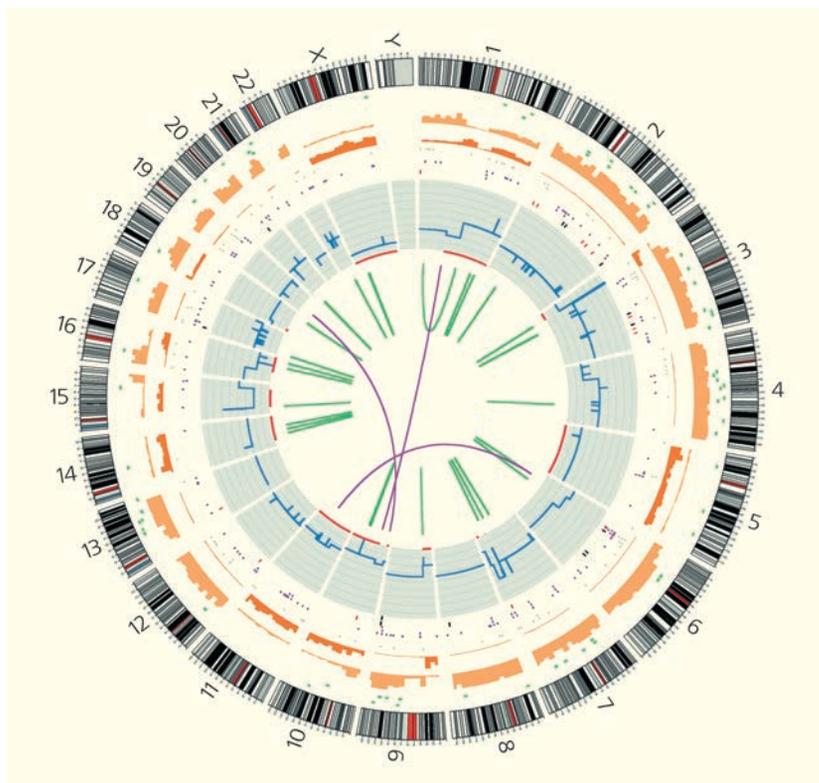


Рис.1. Комплекс соматических нарушений, выявленных в геноме меланомной клетки: около 30 тыс. однонуклеотидных замен и тысячи малых инсерций/делеций нуклеотидов. Синим цветом показано изменение копийности хромосомных участков, зеленым — внутрихромосомные перестройки, сиреневым — межхромосомные перестройки, красным — потеря гетерозиготности [2].

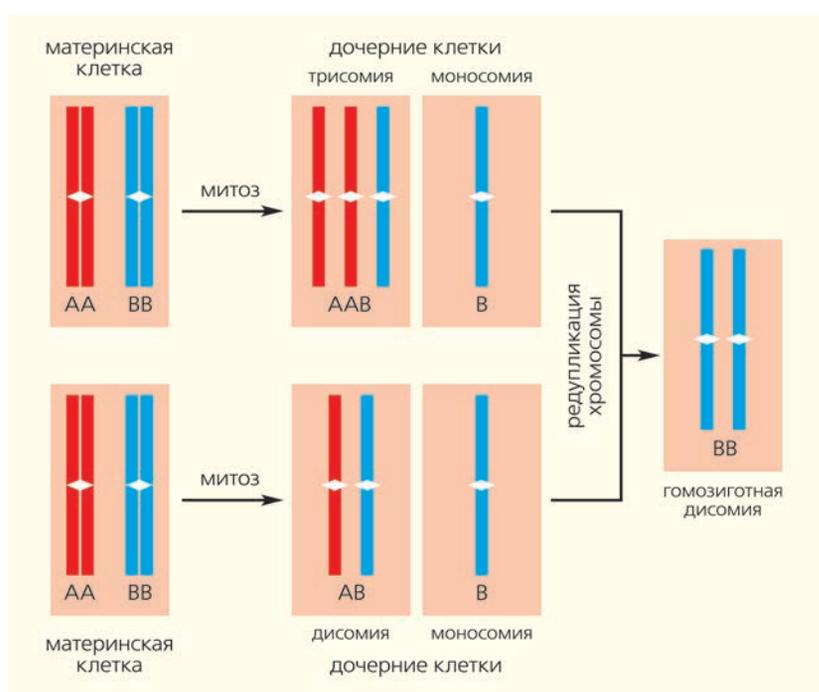


Рис.2. Потеря гетерозиготности при анеуплоидии.

лых инсерций и делеций нуклеотидов, десятков внутрихромосомных и межхромосомных перестроек, но и наблюдается потеря гетерозиготности, затрагивающая различные участки генома вплоть до целых хромосом.

Механизмы потери гетерозиготности

Анеуплоидия. В настоящее время известно несколько механизмов развития потери гетерозиготности. Один из них — утрата целой хромосомы, или моносомия (рис.2) [3]. Она может возникнуть в результате нарушения расхождения сестринских хромосом в митозе, что приводит к формированию трисомной и моносомной дочерних клеток. Потеря целой хромосомы в митозе может произойти и в результате нарушения связи одной из сестринских хроматид с веретенем деления, что приводит к формированию нормальной и моносомной дочерних клеток. В последующем единственная оставшаяся из пары хромосома (материнского или отцовского происхождения) может удваиваться. Таким образом, происходит восстановление копийности генетического материала без исправления потери гетерозиготности: появляется клетка с двумя полностью идентичными хромосомами (с гомозиготной дисомией).

Гомологичная рекомбинация. Потеря гетерозиготности может быть связана с двуцепочечными разрывами ДНК и тем, в какие фазы клеточного цикла, каким образом и насколько эффективно они были подвергнуты исправлению. Во время удвоения генетического материала двуцепочечные разрывы ДНК могут возникать в ломких сайтах хромосом — участках, имеющих ряд структурных особенностей (рис.3) [4].

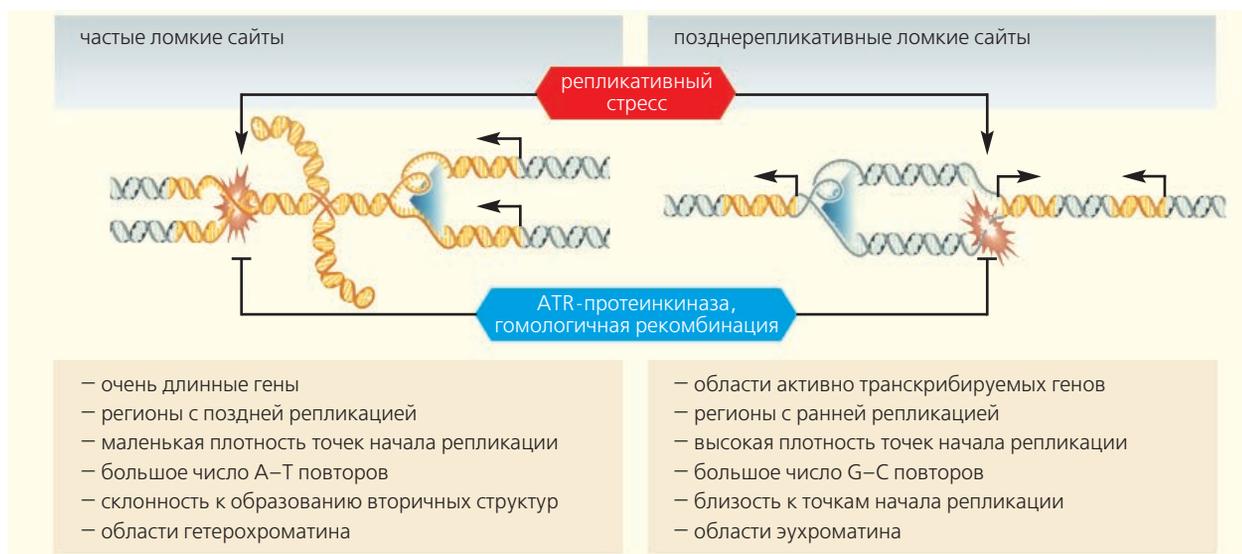


Рис.3. Типы ломких сайтов хромосом, значимых в онкогенезе [4].

Известно, что репликация начинается с определенных участков — точек начала репликации (origin), средняя плотность расположения в геноме которых 1 точка на 50 тыс. п.н. Однако в областях частых ломких сайтов хромосом на протяжении нескольких мегабаз (миллионов пар оснований, Мб) отмечается низкая плотность точек начала репликации. Кроме того, нуклеотидная последовательность данных участков обогащена АТ-повторами, что во время репликации приводит к образованию вторичных структур ДНК, мешающих продвижению репликационной вилки. Располагаются частые ломкие сайты хромосом, как правило, в областях гетерохроматина, где репликация «запаздывает», поэтому еще их называют позднерепликативными. Частые ломкие сайты — нормальное свойство всех хромосом человека, но некоторые из них становятся «горячими точками» хромосомных перестроек при злокачественных новообразованиях.

Относительно недавно был описан другой тип ломких сайтов хромосом, имеющих значение в онкогенезе. Их назвали раннерепликативными. Для таких ломких сайтов характерны расположение в активно транскрибируемых областях генома, высокая плотность точек начала репликации и обогащение последовательности GC-парами, затрудняющие продвижение репликационной вилки.

Застопоривание или остановка репликационной вилки (репликативный стресс) могут возникать не только в областях ломких сайтов хромосом, но и в местах появления одонитевых разрывов, поперечных сшивков, модифицированных оснований и других аномалий ДНК. В результате репликативного стресса к концу синтетической

фазы не происходит полного удвоения генетического материала.

В норме ломкие сайты хромосом не проявляются, поскольку особый белок АТР-протеинкиназа, отслеживающий повреждения ДНК, при участии ряда других молекул в случае обнаружения «недорепликации» активирует остановку клеточного цикла в контрольной точке выхода из синтетической фазы. Далее белок Вернера (фермент, обладающий геликазной активностью) разрешает аномальные структуры ДНК, и процесс репликации в клетке возобновляется. Беда в том, что в опухолях могут возникать мутации в гене *ATR* и/или метилирование гена *WRN*, ответственного за синтез белка Вернера.

В синтетическую и постсинтетическую фазы клеточного цикла репарация двуцепочечных разрывов ДНК происходит путем гомологичной рекомбинации. Поскольку к этому моменту уже синтезированы копии молекулы ДНК, они используются в качестве матрицы для восстановления ДНК в месте повреждения. При этом активный 3'-конец оборванной нити встраивается в неповрежденный гомолог, на котором, как на матрице, проходит синтез недостающих участков нити ДНК. Вновь синтезированные участки затем сшиваются лигазой с основной частью молекулы ДНК.

Завершающий этап процесса гомологичной рекомбинации может осуществляться двумя принципиально различными способами — путем кроссинговера либо геной конверсии. Первый связан с разрешением соединения Холлидея, сопровождающимся образованием разрывов и в донорной и в реципиентной ДНК с последующим обменом

соседними участками ДНК (кроссинговером). При репарации путем гомологичной рекомбинации по второму механизму разрывы в донорной ДНК не образуются, а идет инициированный свободным концом ДНК ограниченный синтез в районе повреждения. Затем вновь синтезированная нить вытесняется и отжигается со вторым свободным концом в реципиентном дуплексе. Таким образом, этот способ приведет к конверсии гена без хромосомных перестроек.

В случае репарации остановленных репликационных вилок механизм гомологичной рекомбинации отличается от классического, поскольку имеет место отсутствие части нуклеотидной последовательности и только один свободный конец ДНК. Процесс носит название рекомбинационно-зависимая репликация [5]. Начинается он также, как и при классической гомологичной рекомбинации, с поиска и проникновения свободного конца нити ДНК в двуцепочечную гомологичную последовательность. Двойная цепь, в которую происходит внедрение, расходитсся с формированием Д-петли, продвигающейся вниз по матрице при синтезе ДНК. Во время миграции вновь синтезированная цепь вытесняется. В последующем новая нить ДНК будет достроена до двуцепочечного состояния вплоть до конца хромосомы (рис.4,а). Нетруд-

но догадаться, что данный вид репарации приводит к появлению наиболее протяженных областей потери гетерозиготности.

Возможна не миграция, а расширение Д-петли и использование ее нити в качестве матрицы для синтеза отстающей цепи новой молекулы ДНК. Разрешение образующегося при этом соединения Холлидея приводит к кроссинговеру (рис.4,б). Третий вариант протекания процесса рекомбинационно-зависимой репликации предполагает, что нить ДНК Д-петли также используется в качестве матрицы для синтеза отстающей цепи, но во время миграции Д-петли обе цепи (лидирующая и отстающая) вытесняются (рис.4,в).

Таким образом, первый и третий вариант рекомбинационно-зависимой репликации приводят к митотической конверсии гена. При втором же варианте помимо переноса генетической информации, митотическая рекомбинация приводит к обмену участками между хромосомами.

При выборе последовательности, которая будет служить матрицей для репарации разрыва, большое значение имеет близость расположения реципиентной и донорной последовательностей друг к другу. При правильном протекании процесса гомологичной рекомбинации в качестве матрицы для восстановления ДНК в месте повреждения используется

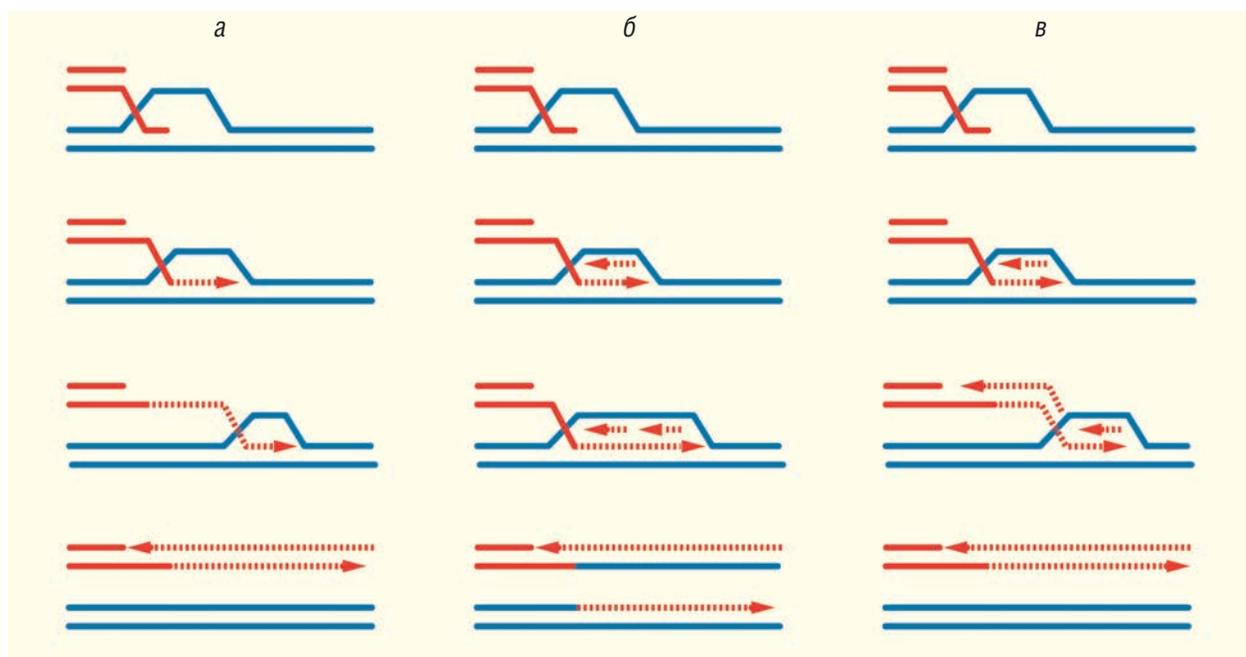


Рис.4. Возможные механизмы рекомбинационно-зависимой репликации: а — миграция соединения Холлидея, синтез по матрице лидирующей цепи новой молекулы ДНК с последующим достраиванием ее до двуцепочечного состояния; б — синтез лидирующей цепи новой молекулы ДНК, использование нити расширяющейся Д-петли в качестве матрицы для синтеза отстающей цепи, разрешение соединения Холлидея с кроссинговером; в — миграция соединения Холлидея, синтез лидирующей и отстающей цепей с последующим их вытеснением [5].

сестринская хроматида. Однако случается так, что матрицей становится гомологичная хромосома или другая близкая последовательность (например, гомологичный ген одного мультигенного семейства), что и приводит к потере гетерозиготности.

В случаях митотической конверсии гена неизбежно образование дочерних клеток, одна из которых будет иметь потерю гетерозиготности (рис.5,а). Тогда как генотип дочерних клеток при митотической рекомбинации зависит от того, как в дальнейшем разойдутся хромосомы в митозе (рис.5,б). Если две рекомбинантные хроматиды в метафазу окажутся друг напротив друга, то обе дочерние клетки будут иметь гетерозиготный генотип (так как рекомбинантные участки взаимно компенсируют друг друга). Если же напротив рекомбинантной хроматиды окажется нормальная, то результатом такого митоза будет потеря гетерозиготности: обе дочерние клетки будут гомозиготными по рекомбинантному локусу.

Негомологичное соединение концов. Двухцепочечные разрывы ДНК приводят к нарушению целостности хромосом — одному из наиболее опасных для клетки повреждений. Они могут быть вызваны различными внешними неблагоприятными воздействиями на клетку, — например, ионизирующего или рентгеновского излучения, либо быть результатом нормальных внутриклеточных процессов. Недавно была предложена модель того, как может происходить повреждение ДНК на якоре петель хроматина. Во время транскрипции генов особый фермент топоизомераза TOP2В «садится» на якорь хроматиновой петли, чтобы ослабить деформацию кручения спирали ДНК путем внесения и последующего устранения двухцепочечного разрыва молекулы, но иногда TOP2В не закрывает разрывы, приводя к онкогенной перестройке хромосом [6].

В фазы клеточного цикла, когда удвоение генетического материала еще не наступило, исправление двухцепочечных разрывов происходит путем негомологичного соединения концов. При этом ферментом лигазой напрямую «сшиваются» близ-

лежащие поврежденные концы хромосом. Данный механизм репарации не всегда точен [7]. Есть вероятность того, что при возникновении нескольких двухцепочечных разрывов ДНК в пределах одной хромосомы произойдет негомологичное соединение лишь концевых фрагментов, что приведет к формированию клетки с потерей гетерозиготности в результате интерстициальной хромосомной делеции.

При появлении в клетке двухцепочечных разрывов ДНК в пределах нескольких хромосом, может произойти негомологичное соединение концов различных хромосом (хромосомная транслокация). В ряде случаев транслокация может носить несбалансированный характер, когда происходит не только изменение мест расположения генов на хромосомах, но и утрата части наследственного материала.

Еще один механизм формирования потери гетерозиготности — терминальная хромосомная делеция, т.е. отсутствие успешного восстановления одиночного двухцепочечного разрыва и потеря концевой фрагмента хромосомы.

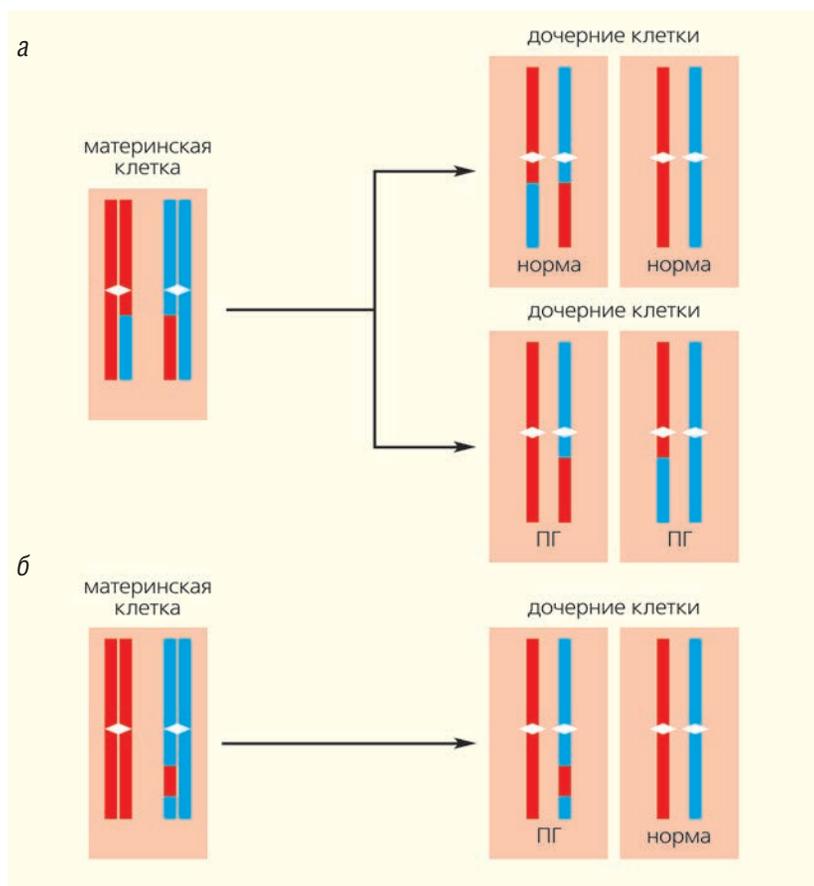


Рис.5. Варианты расхождения хромосом в анафазе митоза при митотической рекомбинации (а) и митотической конверсии гена (б). ПГ — потеря гетерозиготности.

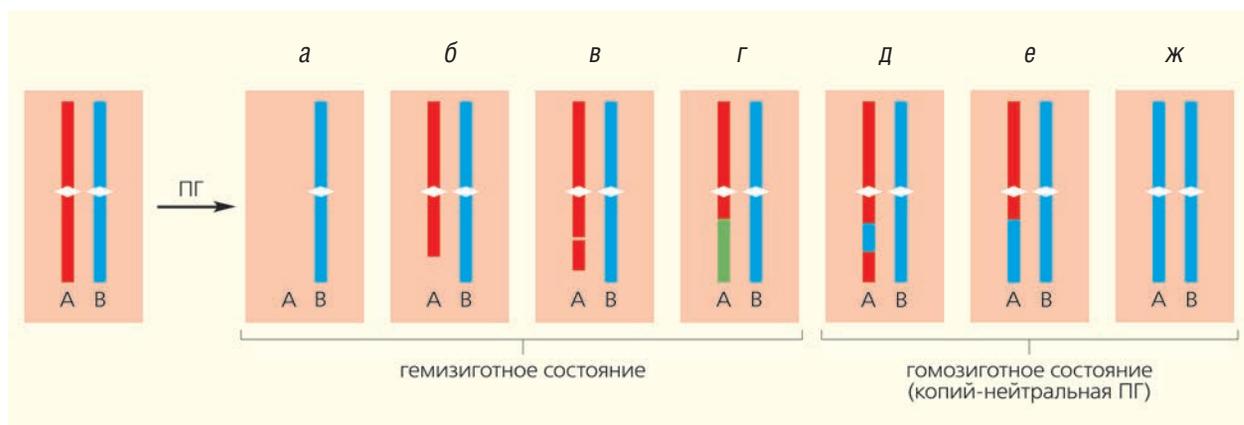


Рис.6. Механизмы потери гетерозиготности: а — утрата целой хромосомы, б — концевая делеция плеча хромосомы, в — интерстициальная хромосомная делеция, г — несбалансированная транслокация, д — митотическая конверсия гена, е — митотическая рекомбинация, ж — утрата хромосомы с последующей редупликацией.

В части случаев потеря гетерозиготности не только приводит к уменьшению изменчивости в участках генома, но и сопровождается изменением копииности генетического материала. Например, при утрате целой хромосомы или ее части в результате делеции или несбалансированной транслокации наблюдается гемизиготное состояние: в клетке остается только один аллель (материнского или отцовского происхождения).

Утрата хромосомы с последующей редупликацией, митотическая конверсия гена или рекомбинация приводят к гомозиготному состоянию: в клетке присутствуют два идентичных аллеля. Такая потеря гетерозиготности называется копий-нейтральной (рис.6). При данном состоянии оба аллеля будут иметь происхождение от одного из родителей, что носит название приобретенная однородительская дисомия.

О полной однородительской дисомии говорят, если копий-нейтральная потеря гетерозиготности затрагивает целую хромосому. Если же копий-нейтральная потеря гетерозиготности распространяется только на часть хромосомы протяженностью более 2 Мб, однородительская дисомия носит сегментарный характер. Исследования показывают, что при ряде злокачественных новообразований однородительская дисомия довольно распространенное явление [8].

Связь потери гетерозиготности с опухолевой прогрессией

Нестабильность генома лежит в основе опухолевой прогрессии — генетически закрепленного, наследуемого опухолевой клеткой и необратимого изменения одного или нескольких ее свойств.

Важно понимать, что, однажды возникнув, генетическая нестабильность склонна прогрессировать: на первых этапах опухолевого роста медленно, а затем быстро нарастая. На тканевом, органном и организменном уровне это сопровождается увеличением степени злокачественности опухоли. Например, при эпителиальных новообразованиях наблюдается последовательный переход от различной выраженности гиперплазии через локализованную карциному (*cancer in situ*) к инвазивному и далее метастатическому раку.

Постоянная изменчивость свойств опухолей, с одной стороны, способствует их адаптации к недостатку кислорода и питательных веществ, ускользанию от иммунологического надзора и лечения, а с другой, делает их гетерогенными. При анализе клеточного состава опухоли было замечено, что со временем в ней формируется множество клонов, каждый из которых накапливает свои молекулярно-генетические нарушения, наделяющие их различной способностью к бесконтрольному делению, инвазии, метастазированию, устойчивости к меняющимся условиям существования и т.д.

Как правило, большая часть клеточного состава опухоли представлена наиболее «успешным» клоном злокачественно-трансформированных клеток, остальные субклоны — небольшой популяцией клеток каждый. С течением времени доминирующий клон может сменяться одним из субклонов, если в какой-то момент последний окажется более «приспособленным».

Несколько лет назад было опубликовано исследование, в котором с помощью однонуклеотидных микрочипов Affymetrix SNP Array были проанализированы геномы в двух группах образцов [9]. Пер-

вую группу составили 60 линий опухолевых клеток из коллекции Национального института рака (National Cancer Institute, NCI) США. Помимо клеточных линий эпителиальных злокачественных новообразований (рака кожи, почек, яичников, легких, кишечника, молочных желез, простаты), туда входили клеточные линии опухолей системы крови и головного мозга. В качестве группы сравнения были проанализированы образцы здоровых людей из международного проекта НарМар, а именно 30 семей «трио» (отец, мать и ребенок). Важно отметить, что и здоровые люди, и пациенты, от которых были получены линии опухолевых клеток, имели европейское происхождение.

По результатам исследования в образцах было зафиксировано наличие так называемых «*gans of homozygosity*» (ROH) – участков генома в диплоидном организме с протяженными (не менее 0.5–1 Мб) областями гомозиготности по однонуклеотидным полиморфизмам (таблица).

Протяженные области гомозиготности могут встречаться у здоровых людей, однако частота их в популяции низкая. Считается, что выявление протяженных областей гомозиготности в геноме здорового человека служит признаком низкой степени различий между отцовской и материнской хромосомами.

Протяженные области гомозиготности в опухолевых образцах встречались с большой частотой (до 50–60%) и фиксировались в регионах генома, где расположены такие гены, как *TP53*, *RB1*, *CDKN2B*, *TOB2*, *CLSPN* и *LATS2* (см. табл.). Стоит кратко остановиться на функции этих генов.

Первые пять участвуют в регуляции клеточного цикла. Так, ген *TP53* отвечает за синтез белка p53, имеющего широкий спектр онкосупрессорных функций. В частности, p53 является транскрипционным фактором, регулирующим не только клеточный цикл, но и процессы апоптоза и репарации ДНК. Другой ген *CDKN2B* кодирует белок MTS-2 (от англ. Multiple Tumor Suppressor 2 –

множественный супрессор опухолей 2), который способен образовывать комплекс с циклинзависимыми киназами и ингибировать их активность. Большинство циклинзависимых киназ участвует в положительной регуляции деления, обеспечивая переход клетки из одной фазы клеточного цикла в следующую.

Белки, кодируемые генами *RB1* и *TOB2*, обеспечивают контроль клеточного цикла в контрольной точке перехода пресинтетической фазы в синтетическую, а pRB еще и участвует в регуляции апоптоза и дифференцировки клеток.

Класпин (продукт гена *CLSPN*) селективно взаимодействует с хроматином в районе репликационных вилок и необходим для остановки клеточного цикла в контрольной точке выхода из синтетической фазы в ответ на репликативный стресс и повреждения ДНК.

Замыкает ряд ген *LATS2*. Он кодирует серин/треонин протеинкиназу, принадлежащую к семейству опухолевых супрессоров LATS (Large Tumor Suppressor). Данный белок локализуется в центросомах во время интерфазы и метафазы. *LATS2* взаимодействует с другими белками центросомы и необходим для накопления тубулина, из которого в начальные периоды митоза формируется веретено деления. Также данный белок функционирует в петле положительной обратной связи с белком p53.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что при опухолевой прогрессии самых различных злокачественных новообразований происходит отбор клеток, утрачивающих гетерозиготность в областях расположения онкосупрессорных генов, вовлеченных в регуляцию контрольных точек клеточного цикла, апоптоза и репарации ДНК. Почему же так происходит?

Злокачественная трансформация – сложный, многоступенчатый процесс, в основе которого лежит активация онкогенов, способствующих опухолевому росту, и/или выключение онкосупрессорных генов, препятствующих ему.

Таблица

Хромосомные районы, наиболее часто подвергающиеся потере гетерозиготности при злокачественных новообразованиях человека [9]

Хромосома	Размер участка, Мб	Ген	Частота ROH NCI-60, %	Частота ROH НарМар, %
1	26.2	<i>CLSPN</i>	60	15.3
9	22.2	<i>CDKN2B</i>	50	2.5
13	48.9	<i>RB1</i>	58	4.3
13	21.6	<i>LATS2</i>	50	0.05
17	7.6	<i>TP53</i>	61	0
22	41.8	<i>TOB2</i>	55	3.8

Протоонкогены кодируют участвующие в положительной регуляции клеточного цикла факторы роста и их рецепторы, протеинкиназы, передающие сигнал в ядро клетки, и транскрипционные факторы. Мутации в них, как правило, носят активирующий характер, приводя к трансформации протоонкогена в онкоген. Уже одного этого события может быть достаточно для трансформации нормальной клетки в опухолевую.

С онкосупрессорами, которые отвечают за негативную регуляцию клеточного цикла, апоптоз и репарацию ДНК, в основном ситуация обстоит иначе. Мутации в них приводят к снижению активности или выключению функции гена и чаще всего носят рецессивный характер. По этой причине в большинстве своем мутации в онкосупрессорах не будут иметь фенотипического проявления при сохранении второго нормального аллеля. Потеря гетерозиготности в гене онкосупрессора, таким образом, приводит к переходу рецессивных мутаций в гомозиготное состояние и служит фактором позитивного отбора в опухоли.

Потеря гетерозиготности в гене *TP53* при лимфомах

Известно целое семейство генов транскрипционных факторов, которое включает в себя *TP53*, *TP63* и *TP73*. Все они имеют высокую степень структурной гомологии, поскольку в процессе эволюции произошли от общего предка [10]. Считается, что у высших позвоночных белки p63 и p73 приняли на себя функции в онтогенетическом развитии тканей и органов, в то время как белок p53 стал хранителем постоянства генома клеток. Вместе с тем, показано, что p73 может активировать p53-чувствительные промоторы и индуцировать апоптоз в p53-дефицитных клетках.

Общее свойство большого числа злокачественных новообразований — потеря гетерозиготности в *TP53*, который называют «дирижером ансамбля генов» противоопухолевой защиты организма. В опухолях с абберациями в *TP53* отмечается особая выраженность генетической нестабильности и быстрые темпы поликлональной эволюции. Однако результирующее действие его аббераций во многом зависит от конкретного вида клеток, что может быть связано с особенностями экспрессии изоформ белка, определяющих различия в активности p53-регулируемых сигнальных путей в клетках разной тканевой принадлежности.

На протяжении многих десятилетий *TP53* считается одним из наиболее активно изучаемых генов. Тем не менее, и сегодня в нашем понимании

механизмов его функционирования существует множество «белых пятен». Исходно меньшее внимание исследователей к *TP53* при опухолях кроветворной ткани привело к тому, что в литературе описаны единичные работы, где изучались бы варианты и последствия биаллельной инактиваций гена при лимфомах (опухоли лимфоидного ростка кроветворения).

Проведенные нами исследования *TP53* при одном из самых распространенных вариантов лимфом — диффузной В-крупноклеточной — выявили наличие большого числа сочетанных (мутации и/или потеря гетерозиготности и/или метилирование промотора) аббераций в гене, что свидетельствует об их приобретении и закреплении в ходе опухолевой прогрессии лимфомы, аналогично тому, как это происходит при эпителиальных злокачественных новообразованиях [11]. Однако в какой последовательности и на каких этапах преобразования нормальных В-лимфоцитов в опухолевые эти повреждения возникают, не всегда ясно.

Отличительная особенность *TP53* — необычный для онкосупрессоров спектр мутаций. Известно, что в генах-онкосупрессорах интенсивно происходит отбор мутаций, приводящих к потере синтеза полноразмерного белка (в результате нонсенс-замен или сдвига рамки считывания). Но более 80% наследуемых и соматических мутаций в *TP53* — это миссенс-замены, которые сопровождаются синтезом стабильного мутантного белка, накапливающегося в ядре опухолевых клеток. Оказывается, большое число миссенс-мутаций в *TP53* приводит к приобретению белком p53 новых, не свойственных ему в норме и способствующих опухолевому росту функций, например, мутант-специфичной транскриптации онкогенов, а также ингибированию других белков семейства (p63 и p73). Поскольку функционирование p53 осуществляется в виде тетрамера, часть мутантных вариантов p53 имеют доминантно-негативный эффект, когда в результате олигомеризации с белком дикого типа нарушается работа всего комплекса.

Описанные факты объясняют, почему в части случаев при лимфомах единственной мутации *TP53* (в отсутствие изменений во втором аллеле гена) может быть достаточно для развития опухоли. С другой стороны, это не исключает возможности появления потери гетерозиготности позднее, в ходе поликлональной эволюции. Так, например, при лимфомах частота выявления потери гетерозиготности в гене возрастает с нарастанием стадии заболевания, а сочетание мутации и потери гетерозиготности в *TP53* способствует развитию синдрома Рихте-

ра — трансформации медленно прогрессирующих вариантов опухоли в агрессивные.

Было установлено, что примерно в каждом десятом образце диффузной В-крупноклеточной лимфомы имеет место потеря гетерозиготности в гене *TP53* в отсутствие мутаций в кодирующих областях гена или метилирования в сохранившемся аллеле. Помимо того, что потеря гетерозиготности может быть «первым ударом», с развитием методов изучения генома, в том числе высокопроизводительного секвенирования, стали накапливаться другие данные, объясняющие это явление.

В ряде подобных образцов лимфомы нами были выявлены функционально значимые мутации в интронах и нетранслируемых областях гена. Так, в 3'-нетранслируемой области *TP53* была обнаружена наследуемая однонуклеотидная замена, которая разрушает нормальную последовательность сигнала полиаденилирования. Он необходим для добавления поли(А)-хвоста — нескольких сотен аденозинмонофосфатов — к концу незрелого мРНК-транскрипта. Отсутствие поли(А)-хвоста приводит к нарушению транспорта мРНК из ядра, ее стабильности и трансляции. И действительно, проведенные другими авторами эксперименты показали, что клетки лимфоидного ряда с этой однонуклеотидной заменой (в отсутствие других изменений в гене) характеризуются значительным снижением уровня экспрессии p53 и апоптоза под действием генотоксических факторов.

В здоровых тканях человека данная однонуклеотидная замена в 3'-нетранслируемой области *TP53* выявляется только в гетерозиготном состоянии. В то же время, более чем в половине случаев обнаружения ее в опухолевой ткани диффузной В-крупноклеточной лимфомы наблюдалась потеря гетерозиготности в гене, что должно способствовать приросту злокачественного потенциала опухолевых лимфоцитов.

Ранее подобное явление было описано при глиомах. Интегративный анализ данных Атласа генома рака (The Cancer Genome Atlas — TCGA) для глиомы показал, что у гетерозиготных носителей

полиморфизма, разрушающего сигнал полиаденилирования гена *TP53*, происходит утрата нормального аллеля во время инициации опухоли или ее прогрессии [12].

Имеются данные, согласно которым другой наследуемый однонуклеотидный полиморфизм, приводящий к замене в 72-м кодоне аргинина на пролин, при некоторых типах опухолей также может влиять на селекцию опухолевых клонов. Так, при сочетанных аберрациях в гене *TP53* мутации выявляются преимущественно в аргинин-содержащем аллеле, тогда как пролин-содержащий аллель подвергается делеции. Связывают это с тем, что мутантный p53 с аргинином в 72-м положении способен ингибировать белок p73 и нейтрализовать p73-индуцированный апоптоз [13]. Учитывая тот факт, что данное явление воспроизводится не при всех типах опухолей, требуется его отдельное изучение при лимфомах.

Безусловно, потеря гетерозиготности на большом протяжении короткого плеча 17-й хромосомы может затрагивать не только *TP53*, но и другие гены. Так, рядом с *TP53* расположены два положительных регулятора его экспрессии — гены *RPL26* и *KDM6B/JMJD3*. *RPL26* особенно важен для увеличения стресс-индуцированного уровня p53, а *KDM6B* еще и модулирует функцию p53, влияя на внутриклеточное распределение белка. Считается, что в ряде случаев потери гетерозиготности в гене *TP53* дополнительная утрата одной из копий данных генов представляет собой еще один механизм снижения функциональной активности p53 в опухоли.

Когда-то Альберт Эйнштейн писал: «Наука не является и никогда не будет являться законченной книгой. Каждый важный успех приносит новые вопросы. Всякое развитие обнаруживает со временем все новые и более глубокие трудности» [14]. Все это в полной мере относится и к вопросу изучения потери гетерозиготности. Приведенные выше факты — показатели сложности и глубины связей между потерей гетерозиготности и развитием опухолей. ■

Литература / References

1. Раменский В.Е., Сюняев Ш.Р. Вычислительный анализ полиморфизма генома человека. Мол. биол. 2009; 43(2): 286–294. [Ramensky V.E., Sunyaev S.R. Computational analysis of human genome polymorphism. Molecular Biology. 2009; 43(2): 260–268. DOI:10.1134/S0026893309020095.]
2. Garnett M.J., McDermott U. Exploiting genetic complexity in cancer to improve therapeutic strategies. Drug. Discov. Today. 2012; 17(5–6): 188–193. DOI:10.1016/j.drudis.2012.01.025.
3. Holland A.J., Cleveland Don W. Losing balance: the origin and impact of aneuploidy in cancer. EMBO Rep. 2012; 13(6): 501–514. DOI:10.1038/embor.2012.55.
4. Mortusewicz O., Herr P., Helleday T. Early replication fragile sites: where replication-transcription collisions cause genetic instability. EMBO J. 2013; 32(4): 493–495. DOI:10.1038/emboj.2013.20.

5. McEachern M.J., Haber J.E. Break-induced replication and recombinational telomere elongation in yeast. *Annu. Rev. Biochem.* 2006; 75: 111–135. DOI:10.1146/annurev.biochem.74.082803.133234.
6. Gómez-Herreros F. DNA Double Strand Breaks and Chromosomal Translocations Induced by DNA Topoisomerase II. *Front. Mol. Biosci.* 2019; 6: 141. DOI:10.3389/fmolb.2019.00141.
7. Pannunzio N.R., Watanabe G., Lieber M.R. Nonhomologous DNA end-joining for repair of DNA double-strand breaks. *J. Biol. Chem.* 2018; 293(27): 10512–10523. DOI:10.1074/jbc.TM117.000374.
8. Tuna M., Knuutila S., Mills G.B. Uniparental disomy in cancer. *Trends Mol. Med.* 2009; 15(3): 120–128. DOI:10.1016/j.molmed.2009.01.005.
9. Ruan X., Kocher J.-P.A., Pommier Y. et al. Mass homozygotes accumulation in the NCI-60 cancer cell lines as compared to HapMap Trios, and relation to fragile site location. *PLoS ONE.* 2012; 7(2): e31628. DOI:10.1371/journal.pone.0031628.
10. Saha T., Kar R.K., Sa G. Structural and sequential context of p53: A review of experimental and theoretical evidence. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 2015; 117: 250–263. DOI:10.1016/j.pbiomolbio.2014.12.002.
11. Воропаева Е.Н. Ген *TP53* при диффузной В-крупноклеточной лимфоме. Ред. Е.Н.Воропаева, Т.И.Пospelova, М.И.Воевода. Новосибирск, 2018. [Voropaeva E.N. The *TP53* Gene in Diffuse Large B-cell Lymphoma. Voropaeva E.N., Pospelova T.I., Voevoda M.I. (eds). Novosibirsk, 2018. (In Russ.).]
12. Wang Z., Rajaraman P., Melin B.S. et al. Further confirmation of germline glioma risk variant rs78378222 in *TP53* and its implication in tumor tissues via integrative analysis of TCGA data. *Hum. Mutat.* 2015; 36(7): 684–688. DOI:10.1002/humu.22799.
13. Marin M.C., Jost C.A., Brooks L.A. et al. A common polymorphism acts as an intragenic modifier of mutant p53 behaviour. *Nature America Inc.* 2000; 25: 47–54. DOI:10.1038/75586.
14. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики: Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квантов. Эйнштейн А. Собрание научных трудов в 4 т. Ред. И.Е.Тамм, Я.А.Сморodinский, Б.Г.Кузнецов. М., 1967; 4: 540. [Einstein A., Infeld L. The Evolution of Physics: The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta. Einstein A. Collection of Scientific Works in Four Volumes. Tamm I.E., Smorodinsky Ya.A., Kuznetsov B.G. (eds). Moscow, 1967; 4: 540. (In Russ.)]

Loss of Heterozygosity and Oncogenesis

E.N.Voropaeva¹, T.I.Pospelova², M.I.Voevoda¹, V.N.Maksimov¹

¹Institute of Internal and Preventive Medicine, Branch of Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of RAS (Novosibirsk, Russia)

²Novosibirsk State Medical University of the Ministry of Health of Russia (Novosibirsk, Russia)

The loss of some genetic information is a tragic event in the life of eukaryotic cell. The degree of its danger depends on the stage of individual development of the organism (ontogenesis), as well as on the genetic composition and size of the lost area. Thus, the loss (deletion) of chromosome fragments during the embryogenesis causes its death or leads to the birth of a child with hereditary developmental disorders. The loss of an entire autosome chromosome (monosomy) leads to an absolute impossibility of the embryo development. Later, at any of the subsequent stages of ontogenesis, a loss of part of the genetic information in individual cells of the body (which is accompanied by a loss of heterozygosity) may also occur. This is understood as a variability decrease in parts of the genome that were originally characterized by polymorphism. This instability of genome is the basis for tumor progression, a genetically fixed, inherited by a tumor cell, and irreversible change in one or more of its properties. It is important to understand that once it occurs, genetic instability tends to progress: slow at the first stages of tumor growth then it dramatically increases. At the tissue, organ, and organism level, this is accompanied by an increase in the degree of tumor malignancy. A common feature of a large number of neoplasms is the loss of heterozygosity in the *TP53* gene, which is called “the gene band director” of the body’s antitumor defense.

Keywords: genetic instability, loss of heterozygosity, oncogenesis, tumor progression, DNA repair, *TP53* gene, lymphomas.

Изотопный состав железа VLT-базальта с «Луны-24» и происхождение Луны

Э.М.Галимов

Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН (Москва, Россия)

Модель образования системы Земля—Луна путем сжатия и фрагментации газопылевого облака предполагает радикально отличное от принятого формирование железного ядра нашей планеты. Его особенность, помимо прочего, состоит в том, что в ядре должен накапливаться легкий изотоп железа (^{54}Fe). Но из модели мегаимпакта и из существующих представлений о механизме образования ядра подобное явление не следует. Установление фактического изотопного состава ядра может стать критерием правильности той или иной модели. Непосредственно вещество ядра недоступно для исследования, но к решению задачи можно подойти, изучая вещество Луны. Земля имеет массивное ядро, составляющее 32% ее массы, а Луна — лишь небольшое. И если ядро Земли будет обогащено легким изотопом железа, то это заметно скажется на изотопном составе мантии в сторону обогащения ее тяжелым изотопом (^{57}Fe). В то же время изотопный состав железа силикатной части Луны почти не будет отличаться от исходного. Иначе говоря, признаком обогащения земного ядра легким изотопом стало бы обогащение пород земной мантии тяжелым изотопом по сравнению с мантией Луны. Наиболее достоверно отражает изотопный состав железа лунной мантии изотопный состав железа очень низкотитанистых (VLT) лунных базальтов. Они аналогичны земным базальтам срединно-океанических хребтов (MORB). Лунные VLT-базальты вследствие глубинного залегания мало распространены на поверхности. Они редки в коллекции образцов, собранной американскими астронавтами экспедиций «Аполлон». Изотопный состав железа в них до сих пор не изучался. Мы совместно с японскими коллегами впервые исследовали изотопный состав железа VLT-базальтов, доставленных советским космическим аппаратом «Луна-24». Из полученных данных следует, что содержание изотопа ^{57}Fe в мантии Земли выше, чем в лунной. А это свидетельствует об обогащении ядра Земли изотопом ^{54}Fe , что, в свою очередь, согласуется с моделью формирования системы Земля—Луна путем фрагментации газопылевого облака.

Ключевые слова: происхождение системы Земля—Луна, генезис земного ядра, лунные VLT-базальты, изотопный состав железа Луны, $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$.

Недавно мы вместе с японскими учеными измерили изотопный состав железа в образцах лунного грунта, доставленного советскими автоматическими станциями «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24». Результаты исследования доложены на состоявшемся в прошлом году изотопном симпозиуме в Москве [1] и опубликованы в специализированном журнале [2].

Выполненное впервые исследование изотопного состава железа в отечественной коллекции лунных образцов — интересный факт, но рядовое научное событие, если учесть, что уже много данных по изотопному составу железа лунного грунта было получено раньше при исследовании образцов обширной американской коллекции «Аполлон».



Эрик Михайлович Галимов, академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, научный руководитель Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН (директор в 1992–2015 гг.), почетный профессор Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, член Президиума РАН (2002–2013), президент Международной ассоциации геохимии и космохимии IAGC (2000–2004). Геохимик. Награжден медалью Альфреда Трейбса (2004) и золотой медалью В.И.Вернадского (2018), лауреат Государственной премии РФ по науке и технологиям (2016).
e-mail: galimov@geokhi.ru

Более интересно и более значимо то, что проанализирована лунная порода, которая ранее не исследовалась. Это образец очень низкотитанистого базальта (very low titanium), или VLT-базальта. Подобные породы редки на поверхности Луны. Так называемые лунные моря заполнены более

высокотитанистыми базальтами. Именно они чаще и отбирались американскими астронавтами. VLT-базальт определен в образцах только одной («Аполлон-17») из шести лунных экспедиций «Аполлон». Но и он не исследовался, поскольку, видно, не ставилась специальная задача.

Такая задача возникла в связи с проблемой происхождения Луны, точнее, системы Земля—Луна. При этом по счастливой случайности VLT-базальт оказался в составе грунта, отобранного нашей беспилотной станцией «Луна-24». Вот об этой научной задаче и о том, как ее решение связано с исследованием изотопного состава железа лунного VLT-базальта, и пойдет речь.

Изотопия железа

Для начала несколько слов об изотопии железа. Геохимия изотопов уже давно стала одним из наиболее эффективных инструментов изучения природных процессов. Определение соотношений изотопов таких элементов, как углерод ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), кислород ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$), водород (D/H), вошло в практику геологических исследований с 1950–1960-х годов. Эти элементы входят в состав живого вещества, воды, атмосферы, земных минералов, многих полезных ископаемых. Установление происхождения вещества и условий его образования сегодня, как правило, трактуется в рамках изотопной аргументации.

Сравнительно недавно появилась возможность при помощи нового поколения масс-спектрометров с индуктивно-связанной плазмой с высокой точностью определять изотопный состав железа ($^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$, $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$) в породах и минералах. Железо относится к числу наиболее распространенных элементов. Оно образует ядра планет, участвует в процессах планетарного масштаба. Первые прецизионные определения изотопного состава железа появились в конце 1990-х — начале 2000-х годов.

Изотопный состав железа ($^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$) принято указывать величиной (δ), представляющей собой (как и в случае других стабильных изотопов) отклонение в тысячных долях (‰) полученного значения от значения $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ в условном стандарте. В качестве международного стандарта принято железо IRMM-014 ($^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe} = 15.69$, $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe} = 0.3625$). В некоторых статьях данные приводятся в величинах $\delta^{56}\text{Fe}$. Измеряются отношения $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$. Обе нотации связаны между собой соотношением $\delta^{57}\text{Fe} = 1.48 \cdot \delta^{56}\text{Fe}$ и могут быть легко пересчитаны. Воспроизводимость анализа составляет $\pm 0.03\%$. Многократными измерениями доверительную точность можно довести до $\pm 0.01\%$. В нашем слу-

чае измерения производились в Японии, в Токийском университете, на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (MC-ICP-MS, Nu Plasma II, Nu Instrument, UK).

Проблема происхождения Луны

До сих пор в геологической науке дискутируется проблема происхождения Луны. Наиболее известна модель мегаимпакта, согласно которой на заключительной стадии аккреции Земля столкнулась с другим небесным телом планетного (размером с Марс) масштаба. В результате катастрофы на околоземную орбиту был выброшен расплав, который в конечном счете конденсировался в спутник Земли Луну. Эта концепция была выдвинута американскими астрономами У.Хартманом и В.Девисом [3]. Она объясняла избыточный угловой момент системы Земля—Луна, дефицит железа на Луне по сравнению с Землей, обогащение Луны тугоплавкими элементами и обеднение летучими. Модель сразу получила широкое признание и поддержку. Потом выявились сложности. В числе ее главных слабостей — невозможность совместить удивительное сходство изотопных составов элементов Земли и Луны с динамическими расчетами, из которых следует, что вещество Луны должно было при ударе унаследовать главным образом вещество ударника, а не Земли [4]. К тому же Земля и Луна отличаются содержанием летучих, что обязательно сказалось бы на различии их изотопного состава. А он одинаков. Модель неоднократно модифицировалась [5, 6] и, хотя содержит до сих пор не устраненные слабости, продолжает оставаться в повестке дня [7].

В качестве альтернативы выдвинута модель образования системы Земля—Луна путем фрагментации исходного газопылевого облака. Наиболее полно эта модель изложена в нашей с А.М.Кривцовым книге [8]. Но в разное время в ее разработке принимали участие ученые ряда академических институтов: академики Т.М.Энеев, В.П.Мясников, член-корреспондент А.В.Забродин, А.М.Кривцов, а также Ю.А.Сидоров, М.С.Легкоступов и др. [9, 10].

Наша модель предполагает образование Земли и Луны из общего исходного газопылевого облака в результате его сжатия и фрагментации (рис.1). Твердые частицы имеют состав, отвечающий веществу углистых хондритов. Последние рассматриваются как наиболее примитивное вещество Солнечной системы. Железо в них представлено в виде FeO. Газовая составляющая — в основном первичный водород, на который изначально приходилось более 90% вещества газопылевого облака.

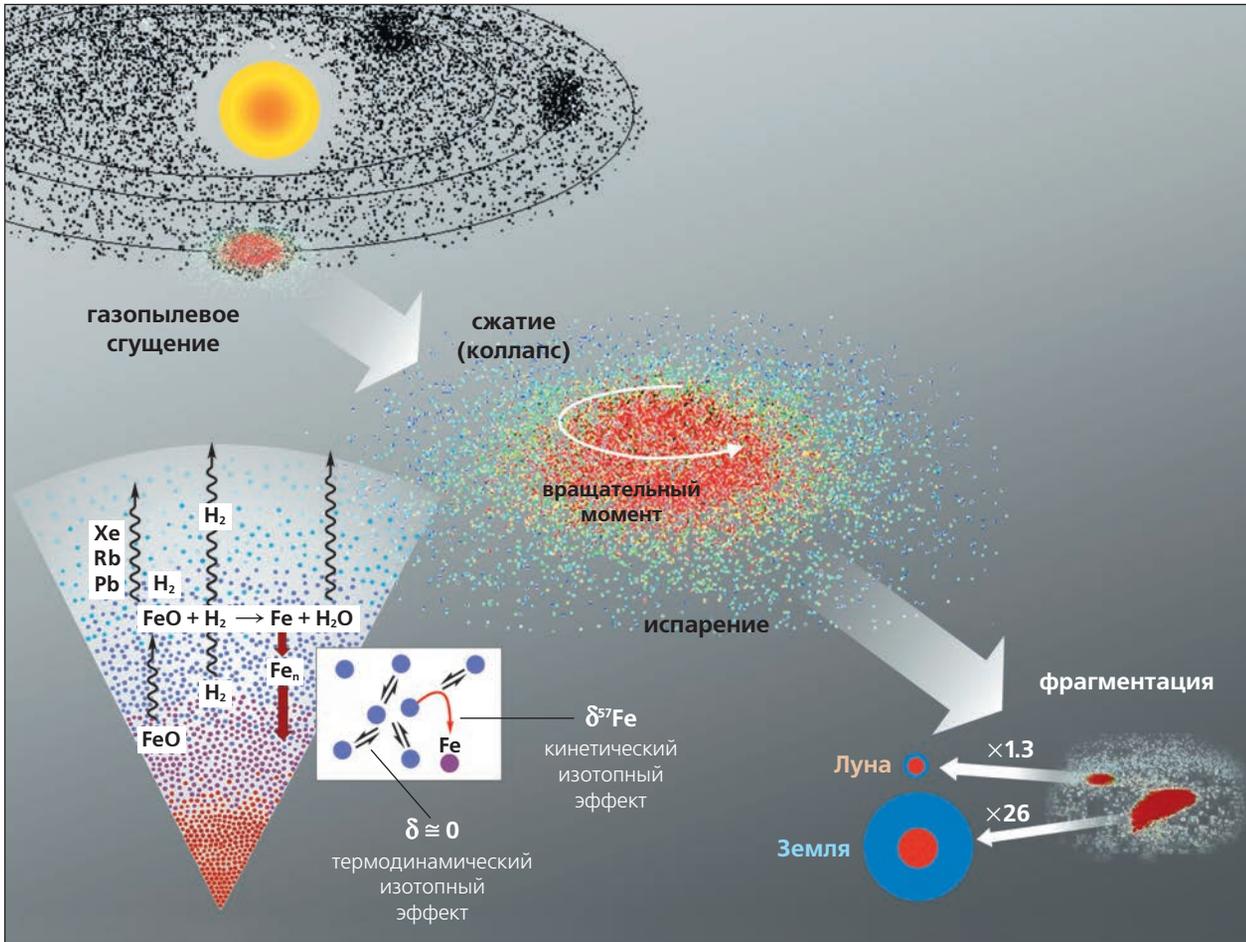


Рис.1. Иллюстрация к механизму формирования Земли и Луны в процессе сжатия и фрагментации родительского газопылевого облака. Подробности в тексте.

Температура внутренней части облака увеличивается по мере сжатия, что приводит к частичному испарению летучих компонентов, в том числе FeO. Испарение играет решающую роль в динамике процесса. Теоретически фрагментация становится возможной (при том угловом моменте, который характерен для системы Земля—Луна), если в уравнения динамики включен член, учитывающий испарение. В результате фрагментации образуются две неравные части, которые становятся зародышами Земли и Луны. При испарении породообразующих оксидов раньше всего теряются оксиды щелочных металлов K и Na, а сразу за ними — FeO (рис.2, внизу). Тугоплавкие же оксиды (Al₂O₃, CaO и TiO₂), напротив, концентрируются. Это экспериментальные данные А.Хашимото [11]. Из экспериментов следует, что при испарении приблизительно 40% вещества углистых хондритов остаток приобретает состав, отвечающий Луне (рис.2, вверху).

Компонент	Земля	CI	Остаток после испарения 40% CI	Луна
SiO ₂	35.5	34.2	42.9	43.4
MgO	24.6	23.7	31.9	32.0
FeO	8.0	35.8	15.8	13.0
Fe	26.0	—	—	3?
CaO + Al ₂ O ₃	4.6	4.35	9.4	10.8

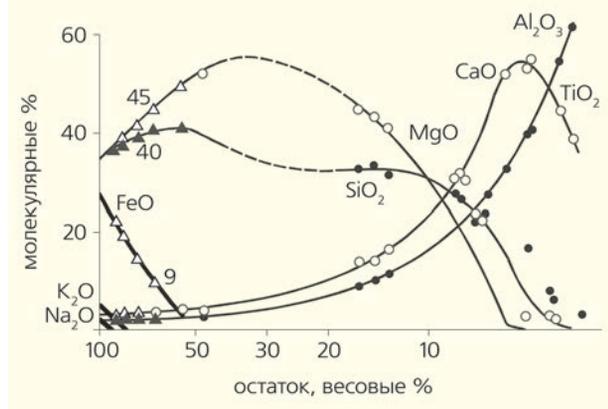


Рис.2. Сопоставление составов (по главным компонентам) Земли и Луны с экспериментальными данными по испарению CI хондритов (вверху) и изменение состава остаточного расплава.

Компьютерное моделирование показывает, что если зародыши не равны по массе, то при последующей аккреции больший фрагмент собирает на себя почти все оставшееся вещество первичного облака, а меньшему достается лишь незначительная часть. Например, если массы фрагментов относятся как 4:1, то больший (будущая Земля) увеличивает массу в процессе последующей аккреции в 26 раз, в то время как меньший (будущая Луна) — только в 1.3 раза.

Первоначально оба зародыша имеют одинаковый состав. Они в равной степени обеднены железом. Однако ввиду последующей различной скорости роста Луна сохраняет высокотемпературный облик своего зародыша, обогащенного тугоплавкими окислами Al, Ca, Ti и обедненного Fe и летучими, в то время как Земля забирает почти весь исходный материал и приближается к составу исходного облака. Это объясняет различие в химическом составе Земли и Луны и известный дефицит железа в Луне по сравнению с Землей.

При аккреции дисперсное состояние вещества определяет особенности изотопного фракционирования. В дисперсной системе испарение происходит в пространство между частицами, и оно обратимо. В этом случае изотопное фракционирование пренебрежимо мало. Вещество, находящееся в газовой фазе, удаляется в потоке газа-носителя и потому также не сопровождается изотопным эффектом. Отсюда наблюдаемое удивительное сходство изотопных составов большинства элементов Земли и Луны (несмотря на различное содержание летучих).

Железо, как следует из нашей концепции, должно вести себя иначе. Его оксид FeO, испаряющийся из частиц, восстанавливается водородом. Кислород удаляется в виде воды, а свободные атомы Fe собираются в кластеры, образуя частицы, которые осаждаются к центру масс, формируя металлическое ядро. Таков механизм формирования ядра в нашей модели.

Поскольку при испарении атомы железа образуют новую металлическую фазу, этот процесс необратим. Он сопровождается кинетическим изотопным эффектом. Поэтому металлические частицы, осаждающиеся в ядро, должны быть обогащены легким изотопом, а железо, остающееся в силикатных частицах, напротив, — тяжелыми. Следовательно, железное ядро планеты в этом случае должно быть обогащено легким изотопом железа ^{54}Fe . Из модели мегаимпакта это никак не следует. Определение изотопного состава железа ядра может стать сильным аргументом в пользу той или иной модели.

Фракционирование изотопов железа

Изотопный состав железа земных пород. Вещество железного ядра недоступно для непосредственного исследования. Но данных об изотопном составе земных пород достаточно много. Наиболее представительным продуктом плавления мантии считаются базальты срединно-океанических хребтов, так называемые MORB (middle ocean ridge basalts). Их изотопный состав в среднем определяется величиной $\delta^{57}\text{Fe} = 0.1\%$. На Земле почти все мантийные субстраты показывают положительные значения $\delta^{57}\text{Fe}$. Образцы мантийных коматиитов и лерцолитов имеют значения $\delta^{57}\text{Fe} = 0.05\%$, дунитов — $\delta^{57}\text{Fe} = 0.035\%$ [12]. П.А.Сосси с соавторами оценивают средний изотопный состав железа мантии величиной $\delta^{57}\text{Fe} = 0.05\%$ [13]. Это отличается от изотопного состава железа хондритов ($\delta^{57}\text{Fe} = -0.01\%$) [14] в сторону обогащения тяжелым изотопом ^{57}Fe . Обычно изотопный состав элементов Земли близок к изотопному составу тех же элементов в хондритах. Если изотопный состав железа Земли в целом соответствует данной величине ($\delta^{57}\text{Fe} = -0.01\%$), то это говорит в пользу отрицательных величин $\delta^{57}\text{Fe}$ в ядре (исходя из баланса с положительными величинами $\delta^{57}\text{Fe}$ в мантии), что согласуется с нашей моделью. Но данные соображения нельзя рассматривать как доказательство, так как есть другая возможность: железо Земли в целом отличается от железа хондритов, т.е. оно в целом имеет изотопный состав $\delta^{57}\text{Fe} = 0.05\%$. А между изотопным составом железа ядра и мантии различий нет. К такому выводу исследователей склоняло также то, что теоретически и экспериментально было показано: в расплаве между металлическим железом и железом в силикатах фракционирование изотопов практически отсутствует.

Механизм формирования ядра, который мы рассматриваем в нашей модели, отличается от общепринятого.

Принятое классическое представление образования ядра состоит в том, что в первичном магматическом океане металлическое железо выделяется из силикатного расплава [15]. Если аккреция происходит путем падения небольших тел, их железные ядра эмульгируются. В таком состоянии происходит возможный изотопный обмен. Капли металлического железа объединяются в более крупные глобулы. Они скапливаются на дне магматического океана, где мантия становится достаточно твердой, а затем быстро проваливаются сквозь нижнюю мантию к ядру — без дальнейшего обмена или фракционирования. Эксперименты показали, что в системе металл — силикатный расплав при тех

температурах и давлениях, когда происходит сепарация железа из расплава ($T \sim 2000$ К, P до 25 ГПа), железо, выделяющееся в металлическую фазу, не обогащается легким изотопом [16, 17]. При соударении Земли с крупными дифференцированными астероидами их ядра тонут в образовавшемся расплаве и присоединяются к растущему ядру Земли. А ядра астероидов (как показывает исследование железных метеоритов) относительно хондритов обогащены скорее тяжелым изотопом Fe, а не легким ($\delta^{57}\text{Fe} = 0.01\text{--}0.32\text{‰}$) [18].

Таким образом, в принятой модели образования земного ядра отсутствует механизм разделения между изотопами железа мантии и ядра. Следуя этой модели, нужно принять, что по каким-то причинам изотопный состав железа Земли (в отличие от всех других элементов) иной, чем в хондритах.

По некоторым данным, при сверхвысоких давлениях (свыше 130 ГПа) существует возможность обогащения металлического железа легким изотопом в равновесии с силикатным железом [19]. Но это не меняет дела, поскольку такие давления намного превосходят те, при которых, как полагают, происходит сепарация железа из расплава. Подобные давления достигаются на границе ядра и мантии уже сформировавшейся планеты.

Иначе говоря, в рамках классической модели нет оснований рассчитывать на обеднение ядра легким изотопом железа в процессе его образования.

Изотопный состав железа лунных пород.

Есть ли какой-либо другой путь к оценке изотопного состава железа земного ядра? Здесь мы обращаемся к Луне. Логика рассуждений следующая: исходим из того, что Земля и Луна совпадают или близки по изотопному составу исходного железа (как это имеет место в случае других элементов). При этом Земля обладает массивным ядром, составляющим 32% ее массы, а Луна — лишь небольшим. Если ядро Земли обогащено легким изотопом железа, это заметно скажется на изотопном составе мантии Земли в сторону обогащения ее тяжелыми изотопами, в то время как изотопный состав железа силикатной части Луны почти не будет отличаться от исходного. Иначе говоря, признаком обогащения земного ядра легким изотопом служило бы обогащение пород земной мантии тяжелым изотопом по сравнению с мантией Луны, т.е. должно соблюдаться условие $\delta^{57}\text{Fe}_{\text{земной мантии}} > \delta^{57}\text{Fe}_{\text{лунной мантии}}$.

Изучение данных по изотопному составу железа Луны, полученных в результате исследования образцов лунного грунта, которые доставили американские астронавты, поначалу разочаровывает. На первый взгляд, они не поддерживают нашу модель. Отношения $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ в лунных базальтах ока-

зались значимо выше, чем в земных. Правда, частично это было связано с изотопным эффектом космического выветривания — бомбардировкой поверхности лунного грунта микрометеоритами [20]. Но и свободные от эффекта выветривания типичные лунные базальты характеризуются высокими значениями $\delta^{57}\text{Fe}$.

Есть одна особенность лунной геохимии. Базальты Луны, как мы уже упоминали, обогащены тугоплавкими элементами. Из числа породообразующих это Ca, Al, Ti. Титансодержащий минерал ильменит (FeTiO_3) — распространенный компонент лунных базальтов. Содержащие его базальты заметно обогащены тяжелыми изотопами железа. Эта связь не прямая. Сам ильменит не обогащен тяжелым изотопом относительно фаялита Fe_2SiO_4 [21]. Но базальты, включающие ильменит, — наиболее поздние в эволюционном ряду кристаллизации магматических пород [22]. При этом известно, что расплав обогащается тяжелыми изотопами железа по мере кристаллизации [23]. На Земле нет базальтов, в такой степени обогащенных титаном (рис.3).

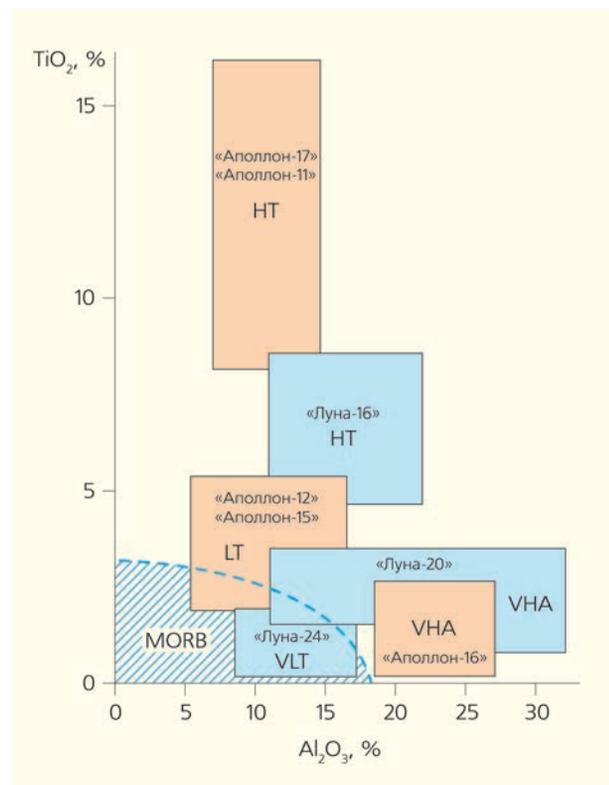


Рис.3. Состав лунных базальтов (в координатах $\text{TiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$), доставленных космическими станциями «Аполлон» и «Луна», в сравнении с соответствующим составом земных базальтов срединно-океанических хребтов (MORB). HT — высокотитанистый базальт, LT — низкотитанистый базальт, VLT — очень низкотитанистый базальт, VHA — высокоглиноземистый базальт.

Среди лунных базальтов выделяют три категории: высокотитанистые (HT — high titanium), низкотитанистые (LT — low titanium) и очень низкотитанистые (VLT — very low titanium). Аналогом земных пород типа базальтов срединно-океанических хребтов (MORB) могут быть лунные VLT-базальты.

На нашей планете базальты срединно-океанических хребтов представляют собой прямой продукт плавления мантии Земли. Это наиболее высокомагнезиальные и низкотитанистые земные базальты. Аналогично этому лунные VLT-базальты генетически наиболее близки к первичному источнику [22]. Они также высокомагнезиальные и наиболее низкотитанистые [24].

Учитывая особенности лунной геохимии, нужно сравнивать изотопный состав железа земных MORB не с типичными высокотитанистыми лунными базальтами, а с очень низкотитанистыми. Именно их сравнение может ответить на вопрос, остается ли земная мантия изотопно более тяжелой, чем лунная. И содержит ли земное ядро повышенную концентрацию легкого изотопа железа.

Так возникла задача исследования лунных VLT-базальтов.

Исследование VLT-базальтов

Очень низкотитанистые базальты мало распространены на поверхности Луны. Как указывают С.Тейлор и П.Джейкс, их источник находится на глубине 200–400 км [25].

На Земле проявления базальтов срединно-океанических хребтов обширны. Они занимают огромные пространства дна океана. Но лунная геология сложилась иначе. Крупные ударные бассейны, которые возникли в результате гигантской бомбардировки Луны 4.0–3.3 млрд лет назад (известные нам как лунные моря), были заполнены лавой, представлявшей собой остаточную от фракционной кристаллизации высокотитанистую жидкость. Поэтому высокотитанистые базальты оказались типичными базальтами на лунной поверхности (хотя и занимают не более 1% объема лунной коры), а действительно представительные для Луны VLT-базальты мало проявлены на поверхности. В обширной американской коллекции они очень редки, встречаются только в образцах «Apollo-17». Изотопный состав железа в них не измерялся. Но в нашей лунной коллекции в грунте с «Луны-24» описаны очень низкотитанистые базальты [26, 27]. «Луна-24» отобрала образец в базальтовом покрове моря Кризисов — одном из наиболее древних бассейнов Луны [28].

Я задался целью исследовать изотопный состав железа VLT-базальтов из коллекции «Луны-24». К сожалению, у нас не было масс-спектрометра нужного типа. Несколько лет назад представители Японского космического агентства и Токийского университета обратились в Российскую академию наук с просьбой предоставить им для показа на выставке образцы лунного грунта, полученного советскими автоматическими станциями. Образцы мы предоставили, но в ходе переговоров я попросил их исследовать в них изотопный состав железа. И вот в начале этого года японские ученые прислали результаты анализов. Мы изучали целый ряд образцов грунта, доставленного всеми тремя станциями: «Луна-16, -20 и -24». Эти данные представляют самостоятельную ценность. Мы обсуждаем их в статье, опубликованной в специализированном журнале [2]. Здесь я остановлюсь лишь на анализе VLT-базальта «Луны-24».

Изотопный анализ VLT-базальта «Луны-24» показал величину $\delta^{57}\text{Fe} = 0.08\text{‰}$, что меньше величины ($\delta^{57}\text{Fe} = 0.1\text{‰}$), характеризующей земные базальты срединно-океанических хребтов (рис.4).

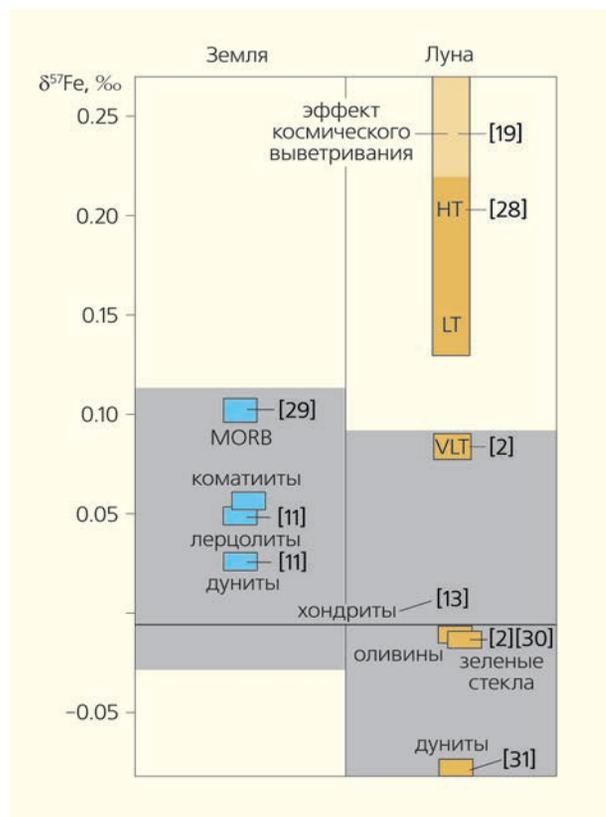


Рис.4. Изотопный состав железа земных и лунных пород. VLT-базальты Луны изотопно легче (по железу), чем земные MORB. Породы мантии Земли имеют более высокие значения $\delta^{57}\text{Fe}$ по сравнению с породами Луны.

Это свидетельствует о том, что железо лунной мантии (которое мы отождествляем с исходным железом для Луны и Земли) действительно изотопно легче железа земной мантии. Поскольку изотопный состав железа Земли и Луны в целом одинаков, наблюдаемый избыток тяжелого изотопа в мантии нашей планеты должен быть уравновешен повышенным содержанием легкого изотопа в ее ядре.

Помимо того что железо лунных VLT-базальтов изотопно легче земных базальтов, многие мантийные лунные материалы показывают отрицательные значения $\delta^{57}\text{Fe}$. Вулканические зеленые стекла близки к хондритам ($\delta^{57}\text{Fe} = -0.029 - -0.014\text{‰}$) [31]. Кстати, Тейлор и Джейкс считали, что тугоплавкие зеленые вулканические стекла представляют вещество глубинных магм — источников VLT-базаль-

тов [25]. По данным К.Вонга с соавторами, значительную отрицательную величину ($\delta^{57}\text{Fe} = -0.50\text{‰}$) показал и лунный дунит [32].

Основываясь на этих материалах, можно предположить, что изотопный состав железа Луны в целом близок или совпадает с изотопным составом железа хондритов. Как отмечалось выше, на Земле почти все мантийные субстраты (гарцбургиты, коматииты и лерцолиты) имеют положительные значения $\delta^{57}\text{Fe}$. Все это указывает на обогащение земной мантии тяжелым изотопом железа по отношению к Луне и хондритам. И с высокой степенью вероятности можно говорить об обогащении земного ядра легким изотопом железа, что, в свою очередь, хорошо согласуется с нашей моделью и с ее предсказанием. ■

Литература / References

1. Галимов Э.М., Okabayashi S., Yokoyama T. и др. Проблема изотопного состава железа Земли и Луны. Измерения $\delta^{57}\text{Fe}$ в образцах лунного грунта «Луна-16, -20, -24» (доклад на XX симпозиуме по геохимии стабильных изотопов, М., 29–31 октября 2019). Геохимия. 2020; 11: 1041–1060. [Galimov E.M., Okabayashi S., Yokoyama T. et al. The problem of the isotopic composition of iron of the Earth and the Moon. Measurements of $\delta^{57}\text{Fe}$ in the LUNA-16, -20, -24 lunar soil samples (report at the XX Symposium on the Geochemistry of Stable Isotopes, Moscow, October 29–31, 2019). Geochemistry International. In press.]
2. Okabayashi S., Yokoyama T., Hirata T., Terakado K., Galimov E. Iron isotopic composition of very low-titanium basalt deduced from iron isotopic signature in Luna 16, 20 and 24 soils. Geochim. Cosmochim. Acta. 2020; 269: 1–14.
3. Hartmann W.K., Davis D.R. Satellite-sized planets and Lunar origin. Icarus. 1975; 24: 504–515.
4. Canup R.M., Asphaug E. Origin of the Moon in a Giant impact near the end of the Earth's formation. Nature. 2001; 41(6848): 708–712.
5. Canup R.M. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. Science. 2006; 338: 1052–1055.
6. Cuk M., Stewart S.T. Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning. Science. 2012; 338: 1047–1052.
7. Бялко А.В., Кузьмин М.И. Осколки образования Луны: геофизические следствия гигантского столкновения. ЖЭТФ. 2019; 156(4): 603–614. [Byalko A.V., Kuzmin M.I. Fragments of the Moon formation: geophysical consequences of the Giant Impact. J. Exp. Theor. Phys. 2019; 129: 511–520. DOI:10.1134/S1063776119100182.]
8. Galimov E.M., Krivtsov A.M. Origin of the Moon. New Concept: Geochemistry and Dynamics. Berlin; Boston, 2012.
9. Galimov E.M., Krivtsov A.M., Zabrodin A.V. et al. Dynamic Model for the Formation of the Earth–Moon System. Geochem. International. 2005; 43(11): 1045–1055.
10. Galimov E.M. Formation of the Moon and the Earth from a common supraplanetary gas-dust cloud (lecture presented at the XIX all-Russia symposium on isotope geochemistry on November 16, 2010). Geochemistry Int. 2011; (49): 537–554.
11. Hashimoto A. Evaporation metamorphism in the early solar nebula. Evaporation experiments on the melt $\text{FeO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ and chemical fractionations of primitive materials. Geochem. J. 1983; (17): 111–145.
12. Dauphas N., Teng F.Z., Arndt N.T. Magnesium and iron isotopes in 2.7 Ga Alexo komatiites: Mantle signatures, no evidence for Soret diffusion, and identification of diffusive transport in zoned olivine. Geochim. Cosmochim. Acta. 2010; (74): 3274–3291.
13. Sossi P.A., Nebel O., Foden J. Iron isotope systematics in planetary reservoirs. Earth Planet. Sci. Lett. 2016; 452: 295–308.
14. Craddock P.R., Dauphas N. Iron Isotopic Compositions of Geological Reference Materials and Chondrites. Geostand. Geoanalytical Res. 2011; 35: 101–123.
15. Stevenson D.J. Models of the Earth's Core. Science. 1991; 214(4521): 611–619.
16. Roskosz M., Watson H.C., Mysen B.O. et al. Experimental quantification of the fractionation of Fe isotopes during metal segregation from a silicate melt. Earth Planet. Sci. Lett. 2006; 248: 851–867.
17. Hin R.C., Schmidt M.W., Bourdon B. Experimental evidence for the absence of iron isotope fractionation between metal and silicate liquids at 1 GPa and 1250–1300°C and its cosmochemical consequences. Geochim. Cosmochim. Acta. 2012; 93: 164–181.
18. Williams H.M., Markowski A., Quitté G. et al. Fe isotope fractionation in iron meteorites: New insights into metal-sulphide segregation and planetary accretion. Earth Planet. Sci. Lett. 2006; 250: 486–500.
19. Polyakov V.B. Equilibrium iron isotope fractionation at core-mantle boundary conditions. Science. 2009; 323(5916): 912–914.

20. *Weisly R.A., Beard B.L., Taylor L.A., Johnson C.M.* Space weathering processes on airless bodies: Fe isotope fractionation in the lunar regolith. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003; 216: 457–465.
21. *Sossi P.A., O'Neill H.S.C.* The effect of bonding environment on iron isotope fractionation between minerals at high temperature. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2017; 196: 121–143.
22. *Snyder G.A., Taylor L.A., Neal C.R.* A chemical model for generating the sources of mare basalts: Combined equilibrium and fractional crystallization of the lunar magmasphere. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1992; 56: 3809–3823.
23. *Weyer S., Ionov D.A.* Partial melting and melt percolation in the mantle: The message from Fe isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007; 259: 119–133.
24. *Vaniman D.T., Papike J.J.* Very low Ti/VLT/basalts — a new mare rock type from the Apollo 17 drill core. 8th Lunar and Planetary Science Conference. Houston, 1977; 1444–1449.
25. *Taylor S.R., Jakes P.* The geochemical evolution of the moon. Lunar Science Conference, 5th, Houston, Tex., March 18–22. N.Y., 1974; 2: 1287–1305.
26. *Barsukov V.L.* Preliminary data for the regolith core brought to the Earth by the automatic lunar station Luna 24. 8th Lunar and Planetary Science Conference. Houston, 1977; 3303–3318.
27. *Grove T.L.* Cooling histories of Luna 24 very low Ti (VLT) ferrobasalts: An experimental study. *Proc. Lunar Sci. Conf.* 1978; 9: 565–584.
28. *Вассербург Дж., Папанастасиу Д.А., Мак-Каллок М.Т. и др.* Петрология, химия, возраст и история облучения образцов «Луны-24». Лунный грунт из Моря Кризисов. Ред. В.Л.Барсуков. М., 1980; 219–230. [*Wasserburg G., Papanastassion D.A., McCulloch M.T. et al.* Petrology, chemistry, age and irradiation history of “Luna 24” samples. Lunar soil from Mare Crisium. V.L.Barsukov (ed.). Moscow, 1980; 219–230. (In Russ.).]
29. *Elardo S.M., Shahar A.* Non-chondritic iron isotope ratios in planetary mantles as a result of core formation. *Nat. Geosci.* 2017; 10: 317–321.
30. *Schoenberg R., Blanckenburg F.von.* Modes of planetary-scale Fe isotope fractionation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006; 252: 342–359.
31. *Poitrasson F., Halliday A.N., Lee D.C. et al.* Iron isotope differences between Earth, Moon, Mars and Vesta as possible records of contrasted accretion mechanisms. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004; 223: 253–266.
32. *Wang K., Jacobsen S.B., Sedaghatpour F. et al.* The earliest Lunar Magma Ocean differentiation recorded in Fe isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015; 430: 202–208.

Iron Isotopic Composition of Lunar VLT-Basalt and the Origin of the Moon

E.M.Galimov

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS (Moscow, Russia)

The model of the Earth—Moon system formation by compression and fragmentation of a gas-dust cloud suggests a radically different formation of the iron core of the planet from the accepted one. Among other peculiarities is an accumulation of the light isotope of iron (^{54}Fe) in the nucleus. However, such a phenomenon does not follow neither from the megaimpact model, nor from the existing ideas about the mechanism of the core formation. So, the establishing the actual isotopic composition of the nucleus can become a criterion for the correctness of a particular model. The substance of the nucleus itself is not accessible for research, but the problem can be solved by studying the substance of the Moon. The Earth has a massive core, about 32% of its mass, and the Moon has only a small one. So that, if the Earth's core is enriched with a light isotope of iron, then this will noticeably affect the isotopic composition of its mantle toward the enrichment with the heavy isotope (^{57}Fe), while the isotopic composition of iron in the silicate part of the Moon will hardly differ from the primary matter. In other words, enrichment of the Earth's mantle rocks with a heavy isotope in comparison with the Moon mantle would be a sign of enrichment of the Earth's core with a light isotope. The most reliable reflection of the iron isotopic composition of the lunar mantle is the iron isotopic composition of the very low-titanium (VLT) lunar basalts. They are similar to terrestrial basalts of the mid-ocean ridges (MORB). Lunar VLT-basalts due to deep occurrence are not very common on the surface. They are rare in the collection of samples delivered by the American astronauts of the “Apollo” expeditions. The isotopic composition of iron in them has not yet been determined. Together with our Japanese colleagues, for the first time, we studied the iron isotopic composition of VLT-basalts delivered by the Soviet Luna-24 mission. Our results suggest that the content of the ^{57}Fe isotope in the Earth's mantle is higher than that in the lunar one. This indicates the enrichment of the Earth's core with the ^{54}Fe isotope, which, in turn, is consistent with the model of the formation of the Earth—Moon system by fragmentation of a gas-dust cloud.

Keywords: origin of the Earth—Moon system, genesis of the Earth's core, lunar VLT-basalts, isotopic composition of the iron of the Moon, $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$.

Космогенные сферулы в океане

О.Л.Савельева¹, Д.П.Савельев¹, С.В.Москалёва¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский, Россия)

В атмосферу Земли ежедневно поступают тонны, а по некоторым оценкам, десятки и даже сотни тонн космического вещества. Большую его часть составляют микроскопические объекты. Значительная их часть нагревается и плавится во время прохождения через атмосферу, что приводит к образованию космогенных шариков (сферул) с характерными, иногда очень красивыми структурами. Во время экспедиции корвета «Челленджер» 1872–1876 гг. похожие шарики были обнаружены в глубоководных железомарганцевых конкрециях, а также во вмещающей их красной глине. С этого времени многие исследования были посвящены сферулам из глубоководных океанских осадков, Fe-Mn-конкреций и корок. Внутренние области океанов удалены от источников техногенного заражения, и при правильной подготовке проб исследователь может быть уверен, что такие шарики — природные. Космогенные сферулы могут служить одним из источников платиноидов в глубоководных отложениях.

Ключевые слова: космогенные сферулы, железомарганцевые корки, элементы платиновой группы.

В атмосферу Земли ежедневно поступают тонны, а по некоторым оценкам, десятки и даже сотни тонн космического вещества [1, 2]. Большую его часть составляют микроскопические объекты. Преобразованные частицы космической пыли размером от 10 мкм до 2 мм, достигшие земной поверхности, называют микрометеоритами [3]. Значительная их часть нагревается и плавится во время прохождения через атмосферу, что приводит к образованию космогенных шариков (сферул) с характерными, иногда очень красивыми структурами (рис.1, а, б). Кроме того, шарики возникают и за счет абляции более крупных тел.

Найти сферулы можно даже на крышах городских домов [4], но многие из них окажутся техногенными — брызгами от сварки, шлифовки и сверления металлов. Материал внеземного генезиса чаще собирают там, где привнос искусственных частиц минимален. Существуют, например, коллекции микрометеоритов изо льда и снега Гренландии



Ольга Леонидовна Савельева, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Область научных интересов — литология, стратиграфия.
e-mail: savelyeva@kscnet.ru



Дмитрий Павлович Савельев, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник того же института. Круг научных интересов охватывает вопросы петрологии, минералогии, геодинамики.
e-mail: savelyev@kscnet.ru



Светлана Васильевна Москалёва, научный сотрудник того же института. Специалист в области электронной микроскопии, минералогии.
e-mail: svemos@rambler.ru

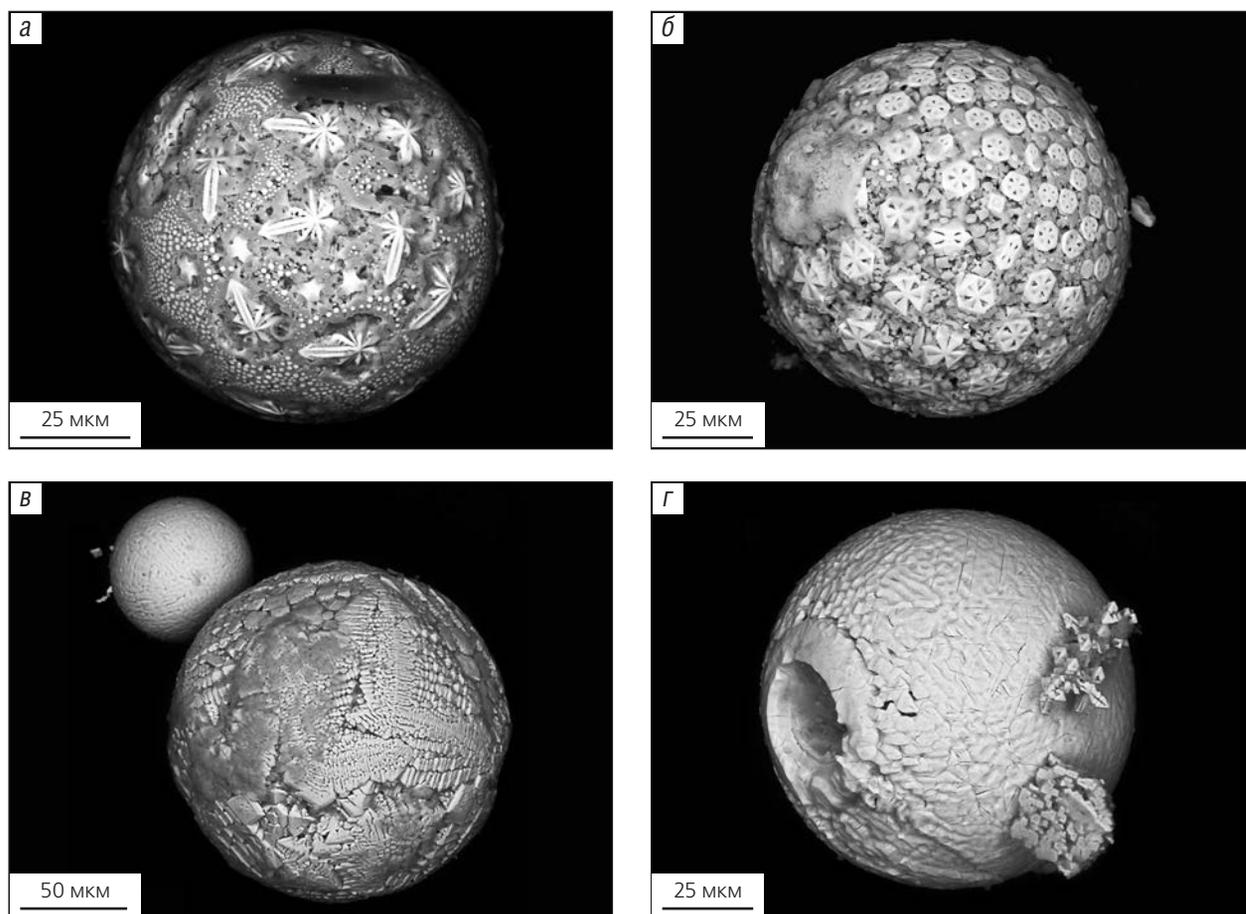


Рис. 1. Микрофотографии космогенных сферул, полученные на сканирующем электронном микроскопе: а, б — сферулы G-типа (скелетные кристаллы оксидов железа в силикатной основной массе); в, г — сферулы I-типа, состоящие из оксидов железа (г — с полостью от железоникелевого ядра).

Здесь и далее фото авторов

и Антарктиды [5, 6]. Во время экспедиции корвета «Челленджер» 1872–1876 гг. космогенные сферулы были обнаружены в глубоководных железомарганцевых конкрециях, а также во вмещающей их красной глине [7]. С этого времени многие исследования были посвящены сферулам из глубоководных океанских осадков, Fe-Mn-конкреций и корок [8–10]. Внутренние области океанов удалены от источников техногенного заражения, и при правильной подготовке проб исследователь может быть уверен, что такие сферулы — природные.

Корки, состоящие из оксидов и гидроксидов Fe и Mn, покрывают поверхности твердых пород на океанских подводных горах на глубине от 400 до 7000 м. Низкие скорости роста корок (менее 10 мм за 1 млн лет) привели к тому, что космогенные сферулы в них сильно сконцентрированы по сравнению с любыми другими отложениями [11]. Например, на Магеллановых горах в западной части Ти-

хого океана в некоторых Fe-Mn-корках содержатся тысячи сферул на килограмм материала [12].

Если антарктические коллекции более или менее отражают состав выпадавших из космоса частиц, то состав сферул в глубоководных осадках и Fe-Mn-образованиях за сотни тысяч или миллионы лет претерпел значительные изменения. Шарики преимущественно силикатного состава растворялись, а более устойчивые, с преобладанием магнетита, — сохранялись [13]. Доля богатых железом сферул в коллекции из водяной скважины на Южном полюсе составляет 3%, а в древних глубоководных отложениях она вырастает до 50% и даже более [4, 14]. Преобладание железных шариков в некоторых коллекциях зависит и от способа их отбора из осадков — при помощи сильного магнита. Не исключено, что на соотношение типов сферул в древних и современных отложениях могло также повлиять изменение во времени состава космического материала, поступающего на Землю [15].

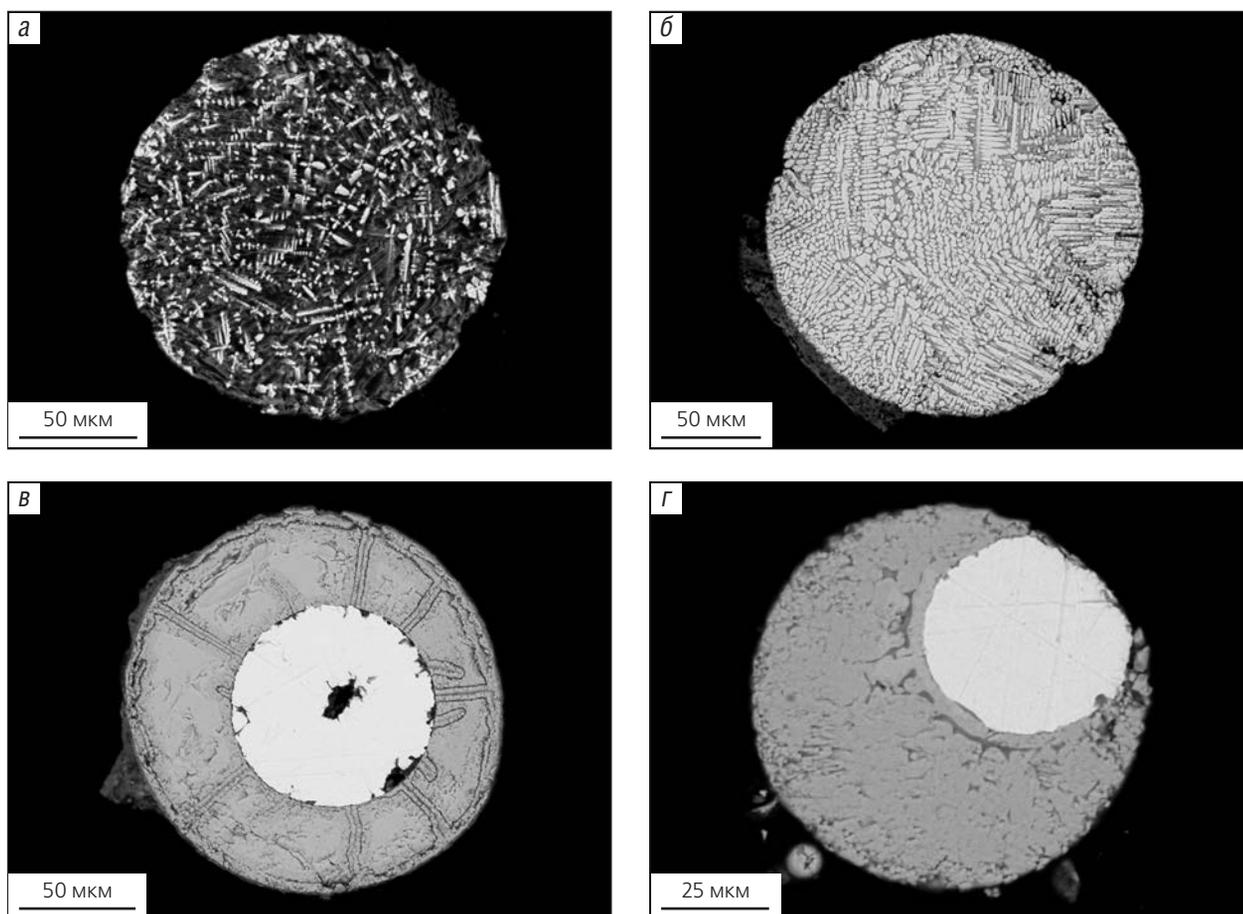


Рис.2. Структуры космогенных сферул в полированных срезах: а, б — скелетные кристаллы оксидов железа в силикатной основной массе; в, г — сферулы, состоящие из железоникелевого ядра в оболочке из оксидов железа.

Сферулы с Магеллановых гор. Большинство шариков, выделенных из раздробленного образца Fe-Mn-корки на гайоте Федорова Магеллановых гор, относится к двум типам [16]. Первый (*G*-тип космогенных сферул) состоит из оксидов железа, которые образуют скелетные кристаллы внутри силикатной основной массы (рис.1,а,б; 2,а,б). В состав второго (*I*-тип) входят оксиды железа (рис.1,в,г) — вюстит FeO и магнетит FeFe_2O_4 с примесью никеля и кобальта [14]. Внутри оксидной оболочки иногда присутствует металлическое ядро из сплава Fe и Ni, также с примесью Co (рис.2,в,г). Среди железооксидных сферул (*I*-типа) встречаются экземпляры с полостями от выпавших ядер (рис.1,з).

Морфология поверхности и внутренняя структура выделенных сферул близки к современным микрометеоритам. Состав металлических ядер отвечает тэниту — никелистому метеоритному железу. Подобные ядра внутри шариков обнаружены экспедицией «Челленджера» и последующими исследованиями [7, 9, 13].

Надо отметить, что сферулы могут образоваться и в результате застывания капелек расплава при вулканических извержениях на Земле. Основное отличие космогенных сферул — присутствие железоникелевого ядра, а также некоторые особенности состава. Другой признак космогенного происхождения материала, состоящего из оксидов железа, — наличие вюстита, который не встречается в вулканических образованиях. Большинство сферул, выделенных из Fe-Mn-корки гайота Федорова, идентифицируются как космогенные [16].

Как же образовались структуры космогенных сферул? Скелетные кристаллы в сферулах *G*-типа сформировались при быстром остывании и окислении силикатно-металлического расплава. Частицы космической пыли влетали в атмосферу на огромной скорости, нагревались, плавилась, примерно 2 с находились в расплавленном состоянии и, затормозив, быстро застывали [17]. Весь период входа в атмосферу занимал не более 5 с [8]. При плавлении содержащееся в космических частицах железо окислялось,

а кристаллизация происходила уже в виде оксидов железа в силикатном матрикесе.

Сферулы I-типа могли образоваться разными способами (рис.3). Некоторые из них произошли из космической пыли преимущественно железоникелевого состава (см. рис.3,а). Когда такие частицы плавилась в атмосфере, железо на периферии расплавленного шарика начинало окисляться. Металлы, более тугоплавкие (Ni, Co и платиноиды), чем железо, скапливались в неокисленном Fe-Ni-ядре [8, 18, 19], которое гораздо тяжелее оксидной оболочки. Под действием сил инерции при торможении оно смещалось в переднюю часть сферулы (по направлению ее полета). Встречаются сферулы

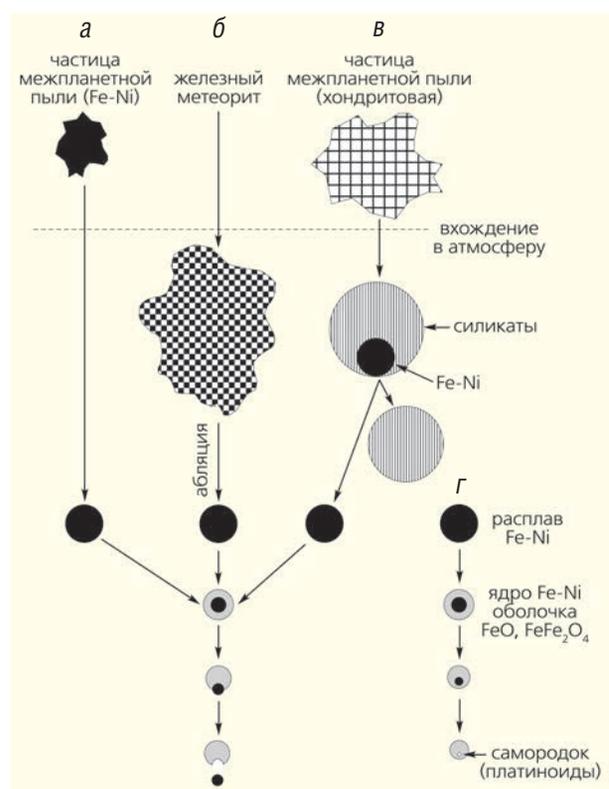


Рис.3. Некоторые модели возникновения и эволюции космических сферул при плавлении в атмосфере: а — металлическая частица межпланетной пыли плавится, окисляясь при этом снаружи; металлическое ядро смещается к краю под действием сил инерции и отделяется от оксидной оболочки; б — поверхность железного метеорита плавится, от нее отделяются расплавленные металлические капли (далее см. а); в — частица межпланетной пыли, состоящая из металлов и силикатов, плавится, образуя металлическую и силикатную фракции, которые разделяются силами инерции (далее см. а); г — расплавленная металлическая сферула окисляется снаружи, Fe-Ni-ядро сокращается, концентрируя тугоплавкие элементы; в результате на месте ядра остается «самородок» элементов платиновой группы. Компильация по [8, 18, 19].

с ядром, выступающим из оболочки. Иногда прямо на лету ядро отделялось от оксидной части, оставляя после себя полость.

Космогенные сферулы I-типа очень похожи на абляционные шарики, отделяющиеся от крупных железных (или богатых железом) метеоритов, когда их поверхность плавится во время полета через атмосферу (см. рис.3,б). При обильном поступлении абляционных сферул их можно идентифицировать по некоторым особенностям химического состава (например, по более низкому содержанию кобальта в Fe-Ni-ядрах) [18]. Но коллекции, в которых преобладают абляционные сферулы, по-видимому, очень редки.

Эволюция сферулы I-типа бывает и более сложной. Некоторые исследователи предполагают, что частицы космической пыли, давшие начало сферулам I-типа, могли быть не только металлическими, но и силикатно-металлическими [8, 10]. Доказано, что сферулы с Fe-Ni-ядрами из глубоководных осадков Индийского океана образовались из космической пыли, которая имеет состав углистых хондритов различных классов [20, 21]. При входе в атмосферу космическая частица плавилась, при этом металлическая фаза отделялась от силикатно-расплава из-за их несмесимости (см. рис.3,в). Вследствие большой разницы в плотностях металлическая и силикатная фракции разделялись силами инерции, образуя две сферы, которые продолжали полет отдельно друг от друга. Что происходило дальше с выделившейся металлической сферулой, мы уже знаем: она начинала окисляться, формируя Fe-Ni-ядро и оксидную оболочку.

Если металлическое ядро не отделялось от оксидной оболочки, а процесс окисления продолжался, Fe, Ni и Co полностью переходили в окружающие вюстит и магнетит, и на месте ядра могла остаться только совсем небольшая капля самых тугоплавких металлов [8, 10]. Поскольку большинство метеоритов, в особенности железные, содержат много платиноидов, остаточный «самородок», образующийся в вюстит-магнетитовой сферуле, иногда сложен элементами платиновой группы (см. рис.3,з). Более того, теоретически показано, что при экстремальной скорости частицы температура может подняться свыше 2400°C, ее оксидная оболочка испарится, и на Землю упадет маленький осколок, обогащенный самыми тугоплавкими платиноидами — осмием и иридием [8]. Однако пиковые температуры, которые испытывают микрометеориты размером менее миллиметра, редко превышают 1700°C [17].

Платиноиды в микрометеоритах. Н.Г.Рудрасвами с соавторами наблюдали частицы плати-

ноидов в микрометеоритах, извлеченных из глубоководных осадков Индийского океана [10]. Они описали два типа выделений: размером в несколько микрометров с тугоплавкими иридием, осмием и рутением и размером меньше микрометра, с более летучими элементами — платиной, родием и палладием. Обе ассоциации встречены в одной и той же сферуле. Это означает, что платиноиды фракционируются на две подгруппы вследствие нагревания и окисления при поступлении в атмосферу. Одна наблюдаемая частица включала все платиноиды, кроме палладия — самого летучего из металлов платиновой группы, который, скорее всего, испарился почти полностью [10].

Сходные выделения платиноидов были описаны нами в коллекции, извлеченной из Fe-Mn-корки с Магеллановых гор [16]. В нескольких сферулах, состоящих из глобул магнетита в вюститовом матрикс, обнаружены микровыделения родистой платины размером менее 0.5 мкм. В одной сферуле мы нашли частицу размером 3 мкм, которая состояла из платины, осмия, иридия, рутения с примесью родия, железа и никеля.

Железомарганцевые корки подводных гор важны как потенциальный ресурс многих металлов, в том числе и платиноидов. Среднее содержание Pt в корках Мирового океана составляет, по разным оценкам, от 268 до 450 мг/т [22, 23]. Максимальные концентрации Pt в корках (до 3100 мг/т) обнаружены в северо-западной части Тихого океана [24].

На сегодняшний день наиболее обоснована гипотеза, по которой платина концентрируется в оке-

анских Fe-Mn-корках из воды. Это происходит преимущественно путем сорбции комплексного аниона Pt на оксиде марганца вернадите, с последующим замещением марганца платиной [24, 25]. Платина в этой реакции окисляется, а марганец восстанавливается. Наши находки частиц платиноидов в сферулах из Fe-Mn-корки свидетельствуют в пользу того, что часть платины в гидrogenных корках связана с космическим веществом. П.Хальбах с соавторами считают, что доля космогенной платины в корках может достигать одной четвертой общего ее содержания [26].

Скорее всего, действуют оба механизма. Не исключено, что основным источником платиноидов в океанской воде также служит космогенный материал, ведь метеориты, особенно железные и железокосмические, на один-два порядка больше обогащены платиной по сравнению с большинством пород, составляющих земную кору и мантию.

* * *

В приведенном обзоре мы рассмотрели удивительно сложную историю падающей из космоса на Землю частицы, проследили, как за 5 с ее торможения успели образоваться прекрасные ажурные структуры и выделиться благородные металлы. Космогенные сферулы могут служить одним из источников платиноидов в глубоководных отложениях. Некоторые из них представляют собой результат интересного природного эксперимента, в микромасштабе повторяющего ранний этап развития планет: разделение на железоникелевое ядро и силикатную мантию. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 18-17-0015).

Литература / References

1. Love S.G., Brownlee D.E. A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science*. 1993; 262(5133): 550–553.
2. Plane J.M.C. Cosmic dust in the Earth's atmosphere. *Chemical Society Reviews*. 2012; 41: 6507–6518.
3. Rubin A.E., Grossman J.N. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics and Planetary Science*. 2010; 45(1): 114–122.
4. Genge M.J., Larsen J., Ginneken M. Van, Suttle M.D. An urban collection of modern-day large micrometeorites: Evidence for variations in the extraterrestrial dust flux through the Quaternary. *Geology*. 2017; 45(2): 119–122.
5. Maurette M., Olinger C., Michel-Levy M.C. et al. A collection of diverse micrometeorites recovered from 100 tonnes of Antarctic blue ice. *Nature*. 1991; 351: 44–47.
6. Taylor S., Lever J.H., Harvey R.P. Numbers, types, and compositions of an unbiased collection of cosmic spherules. *Meteoritics and Planetary Science*. 2000; 35(4): 651–666.
7. Murray S., Renard A.F. Report on deep-sea deposits based on the specimens collected during the voyage of H.M.S. Challenger in the years 1872 to 1876. L., 1891.
8. Brownlee D.E., Bates D.A., Wheelock M.M. Extraterrestrial Pt-group nuggets in deep sea sediments. *Nature*. 1984; (303): 693–695.
9. Finkelman R.B. Magnetic particles extracted from manganese nodules: Suggested origin from stony and iron meteorites. *Science*. 1970; 167: 982–984.
10. Rudraswami N.G., Parashar K., Shyam Prasad M. Micrometer- and nanometer-sized platinum group nuggets in micrometeorites from deep-sea sediments of the Indian Ocean. *Meteoritics and Planetary Science*. 2011; 46(3): 470–491.

11. *Hein J.R., Mizell K., Koschinsky A., Conrad T.A.* Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*. 2013; 51: 1–14.
12. *Торохов М.П., Мельников М.Е.* Акцессорные минералы в гидrogenных железомарганцевых корках Тихого океана – россыпной механизм накопления. Доклады Российской академии наук. 2005; 405(4): 511–513. [*Torokhov M.P., Mel'nikov M.E.* Accessory minerals in hydrogenic ferromanganese crusts of the Pacific Ocean: Placer accumulation mechanism. *Doklady Earth Sciences*. 2005; 405(9): 1288–1290.]
13. *Ginneken M. van, Genge M.J., Folco L., Harvey R.P.* The weathering of micrometeorites from the Transantarctic Mountains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2016; 179: 1–31.
14. *Genge M.J., Engrand C., Gounelle M., Taylor S.* The classification of micrometeorites. *Meteoritics and Planetary Science*. 2008; 43(3): 497–515.
15. *Taylor S., Brownlee D.E.* Cosmic spherules in the geological record. *Meteoritics and Planetary Science*. 1991; 26(3): 203–211.
16. *Савельев Д.П., Ханчук А.И., Савельева О.Л. и др.* Первая находка платины в космогенных сферулах железомарганцевых корок (гайот Федорова, Магеллановы горы, Тихий океан). Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020; 491(2): 1–5. [*Savelyev D.P., Academician Khanchuk A.I., Savelyeva O.L. et al.* First Find of Platinum in Cosmogenic Spherules of Ferromanganese Crusts (Fedorov Guyot, Magellan Seamounts, Pacific Ocean). *Doklady Earth Sciences*. 2020; 491(2): 199–203.] DOI:10.31857/S2686739720040155
17. *Love S.G., Brownlee D.E.* Heating and thermal transformation of micrometeoroids entering the Earth's atmosphere. *Icarus*. 1991; 89(1): 26–43.
18. *Bi D., Morton R.D., Wang K.* Cosmic nickel-iron alloy spherules from Pleistocene sediments, Alberta, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1993; 57: 4129–4136.
19. *Dekov V.M., Molin G.M., Dimova M. et al.* Cosmic spherules from metalliferous sediments: A long journey to the seafloor. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry*. 2007; 183(3): 269–282.
20. *Herzog G.F., Xue S., Hall G.S. et al.* Isotopic and elemental composition of iron, nickel, and chromium in type I deep-sea spherules: Implications for origin and composition of the parent micrometeoroids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999; 63(9): 1443–1457.
21. *Rudraswami N.G., Shyam Prasad M., Babu E.V.S.S.K., Vijaya Kumar T.* Chemistry and petrology of Fe–Ni beads from different types of cosmic spherules: Implication for precursors. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014; 145: 139–158.
22. *Батурин Г.Н., Колесов Г.М.* Благородные металлы в Fe-Mn и фосфатных отложениях океана. Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 16–20 ноября 2009 г. М., 2009: 232–235. [*Baturin G.N., Kolesov G.M.* Noble metals in Fe-Mn and phosphate deposits of the ocean. Materials of the XVIII International Scientific Conference (School) on marine geology. Moscow, November 16–20, 2009. Moscow, 2009: 232–235. (In Russ.)]
23. *Hein J.R., McIntyre B., Koschinsky A.* The Global Enrichment of Platinum Group Elements in Marine Ferromanganese Crusts. Extended Abstracts, 10th International Platinum Symposium, 2005. Oulu, 2005; 98–101.
24. *Koschinsky A., Hein J.R., Kraemer D. et al.* Platinum enrichment and phase associations in marine ferromanganese crusts and nodules based on a multi-method approach. *Chemical Geology*. 2020; 539: 119426.
25. *Maeno M.Y., Ohashi H., Yonezu K. et al.* Sorption behavior of the Pt(II) complex anion on manganese dioxide (д-МnO₂): a model reaction to elucidate the mechanism by which Pt is concentrated into a marine ferromanganese crust. *Mineralium Deposita*. 2016; 51(2): 211–218.
26. *Halbach P., Kriete C., Prause B., Puteanus D.* Mechanisms to explain the platinum concentration in ferromanganese seamount crusts. *Chemical Geology*. 1989; 76: 95–106.

Cosmogenic Spherules in the Ocean

O.L.Savelyeva¹, D.P.Savelyev¹, S.V.Moskaleva¹

¹Institute of Volcanology and Seismology, Far-Eastern Branch of RAS (Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia)

Tons, and according to some estimates, tens and even hundreds of tons of cosmic matter, enter the Earth's atmosphere daily. Most of it is made up of microscopic objects. A significant part of them heats up and melts during passage through the atmosphere, which leads to the formation of cosmogenic balls (spherules) with characteristic, sometimes very beautiful structures. During the expedition of the HMS Challenger Corvette in 1872–1876 similar balls had been found in deep-sea ferromanganese nodules, as well as in the red clay containing them. Since that time, many studies have been devoted to spherules from deep-sea ocean sediments, Fe-Mn nodules, and crusts. Inland areas of the oceans are far away from sources of technogenic contamination, and with a proper sample preparation, a researcher can be sure that such balls are of natural origin. Cosmogenic spherules can serve as one of the sources of platinumoids in deep-sea sediments.

Keywords: cosmogenic spherules, ferromanganese crusts, platinum-group elements.

Радиационная экологическая океанология

Г.Г.Матишов, О.В.Степаньян

Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону, Россия)

Радиационную экологическую океанологию как научное направление в изучении Мирового океана основал член-корреспондент РАН Д.Г.Матишов. В статье рассказывается о становлении этого направления в 1990–2000-х годах и представлены основные результаты, полученные за 20 лет. Показано, что в настоящее время в воде и донных отложениях европейских морей России содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr невелико, однако в морской биоте (рыбах, птицах, млекопитающих) возможны локальные превышения уровня радионуклидов над фоновыми значениями морской среды.

Ключевые слова: радиационная экологическая океанология, радионуклиды, Баренцево море, Азовское море, радиоактивное загрязнение.

Посвящается памяти
член-корреспондента РАН Д.Г.Матишова

Радиационная экологическая океанология — одно из самых новых научных направлений. Оно возникло всего около 20 лет назад на стыке океанографии, радиационной биологии, экологии, морской биологии, гидробиологии и геоэкологии. В то время было необходимо знать, каков на самом деле вклад нашей страны и ряда западных государств в радиоактивное загрязнение Северной Атлантики. Кроме того, требовалась объективная картина загрязнения после трагических аварий советских и российских атомных субмарин «Комсомолец» и «Курск». Расскажем об истории появления радиационной экологической океанологии и представим основные результаты, полученные учеными за последние годы.

Основателем этого направления стал член-корреспондент РАН Дмитрий Геннадьевич Матишов (1966–2015)*. Он собрал коллектив ученых из



Геннадий Григорьевич Матишов, академик, научный руководитель Южного научного центра РАН (Ростов-на-Дону), руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии Отделения наук о Земле РАН. Область научных интересов — полярная океанология, экология моря, геоморфология и палеогеография океана, радиоэкология Арктики.
e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru



Олег Владимирович Степаньян, кандидат биологических наук, заведующий отделом изучения экстремальных природных явлений и техногенных катастроф того же научного центра. Занимается исследованием донной растительности южных морей России.
e-mail: step@ssc-ras.ru

Мурманского морского биологического института Кольского научного центра (ММБИ КНЦ) РАН, Южного научного центра РАН и ряда других науч-

* Дмитрий Геннадьевич Матишов прожил короткую, но яркую жизнь. Он родился в Ростове-на-Дону, в академической семье, но большую часть жизни провел в Мурманске. Организовал Азовский филиал Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН в Ростове, в течение семи лет возглавлял Институт аридных зон Южного научного центра РАН. Основал и возглавил кафедру океанологии в Ростовском государственном университете (ныне Южный федеральный университет), руководил отделом гидрохимии и радиоэкологии ММБИ КНЦ РАН. Входил в резерв управленческих кадров Президента РФ. Награжден золотой медалью Президиума РАН. В 2006 г. за особый вклад в науку награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени.



Первая экспедиция Мурманского морского биологического института на Новую Землю. Август 1990 г.

Здесь и далее фото из архива Г.Г.Матишова



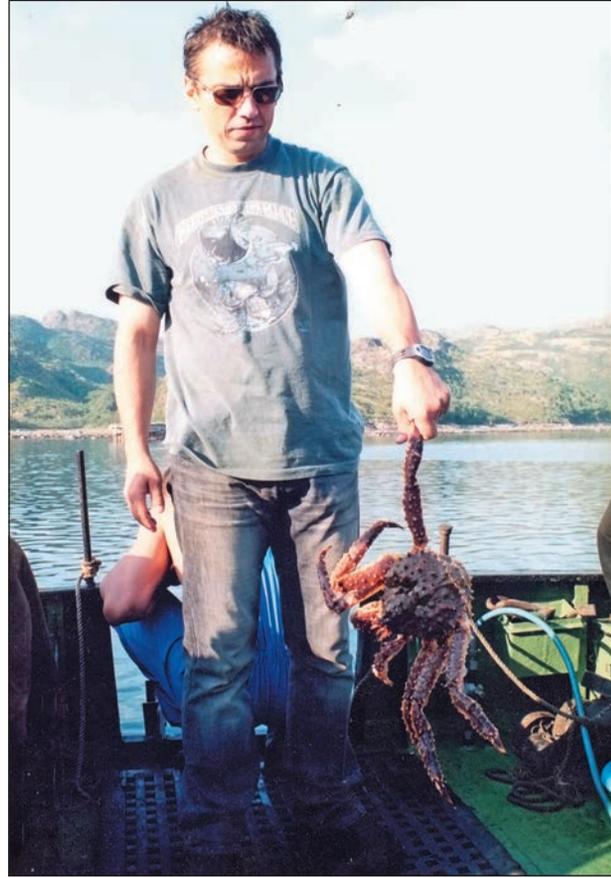
У главного входа в здание Мурманского морского биологического института в пос. Дальние Зеленцы.

ных организаций. Многие специалисты под руководством Матишова увлеченно подключились к разработке новой тематики. Целая плеяда учеников и единомышленников сплотилась в уникальную научную школу, которая успешно работает и в настоящее время.

Интерес к океанологии и радиоэкологии появился у Дмитрия Геннадьевича очень рано, еще во время учебы в Ленинградском государственном университете, во время стажировок в ведущих океанологических лабораториях Европы (в Польше, Германии, Норвегии, Финляндии). Именно во время этих стажировок Матишов познакомился с передовыми исследованиями в области радиоэкологии и встретился с выдающимися западными учеными, которые проводили радиологические исследования не только в Арктическом регионе, но и по всему Мировому океану. В 1994 г. в Санкт-Петербургском государственном университете Матишов защитил кандидатскую диссертацию «Радионуклиды и биоокеанологические явления в экосистеме Баренцева моря», где обозначил основные тезисы нового научного направления. Однако ему потребовалось еще несколько лет, чтобы самому собрать в морских экспедициях материал и обобщить разрозненные данные. Только после этого контуры нового направления стали осязаемы.

Долгие годы в нашей стране радиоэкологические данные (тем более их морская часть) носили гриф «совершенно секретно», так как касались военных разработок ядерного оружия и ядерных испытаний в Баренцевом и Карском морях, на полигонах Новой Земли. Определенная (но все еще дозированной) открытость для ученых появилась только во времена перестройки, после трагической чернобыльской катастрофы в апреле 1986 г. Отметим, что эта трагедия породила массу слухов и дезинформации, причем как среди населения, так и в научном мире. Было неясно, каков на самом деле масштаб загрязнения окружающей среды и как действие радионуклидов отразится на человеке и природе. Одними из первых предавать гласности и вводить в научный оборот новые данные по уровню загрязнения северных и южных морей России стали Д.Г.Матишов и автор этой статьи академик Г.Г.Матишов. Это позволило в определенной степени снизить обеспокоенность мировой общественности и уменьшить международный «нажим» на руководство нашей страны в 1990-х и в начале 2000-х годов [1–5].

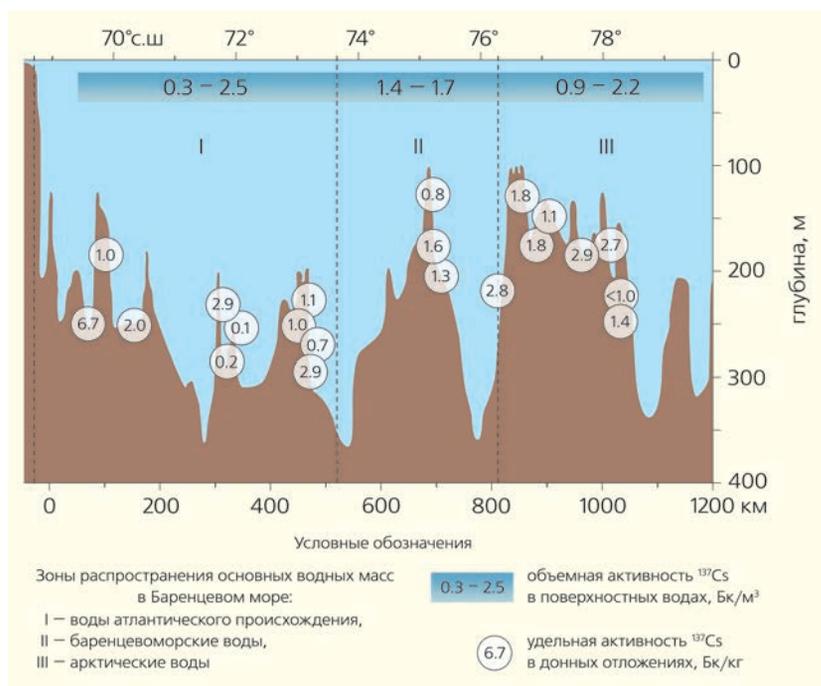
Первые работы были посвящены определению уровней загрязнения цезием и стронцием морской воды и донных отложений в различных районах Баренцева, Карского и Северного морей. Оказа-



Д.Г.Матишов в Кольском заливе во время отбора биологических проб для радиоэкологических исследований.

лось, что наибольшие концентрации радионуклидов приурочены к местам испытаний атомного оружия, базам атомного военного флота, а также к западной границе Баренцева моря [1–5]. Другой вектор исследования был связан с определением радиоактивных элементов в биоте. Ранее российские и зарубежные исследователи основное внимание уделяли только высшим звеньям арктической экосистемы (рыбам, птицам, морским млекопитающим), а специалисты под руководством Дмитрия Геннадьевича первыми стали изучать особенности накопления радиоэлементов в первичном и вторичном звеньях — в бентосе, планктоне и мелких промысловых рыбах. В конечном итоге эти результаты увязывались с данными по загрязнению в высших организмах [1–8]. Именно такой подход позволил снять большинство вопросов, связанных с накоплением радиоактивных элементов и переносом их по арктическим пищевым цепям, ранее казавшимся неясными и туманными.

Опыт, полученный на севере, оказался применим и для южных морей России. В фокус исследований попало Азовское море, сходное с Коль-



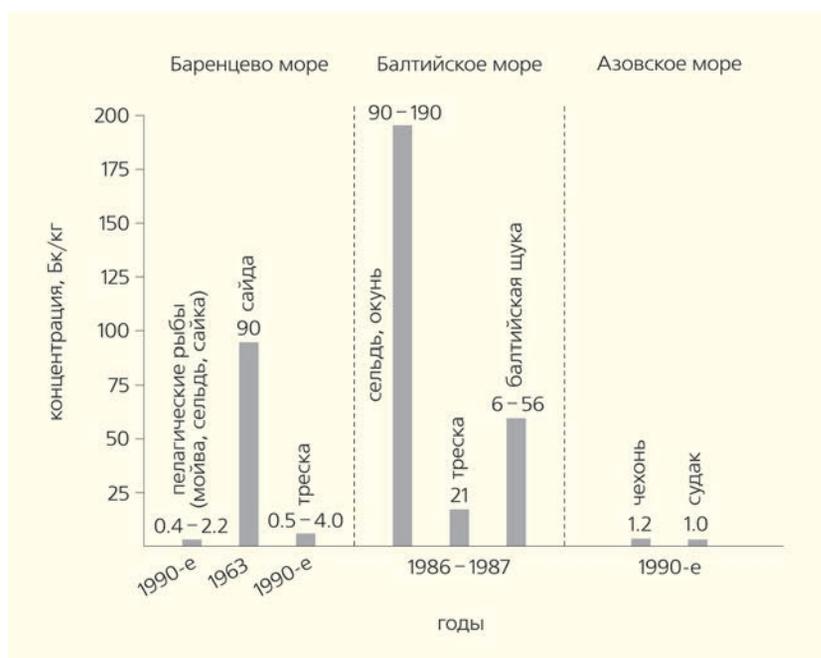
Распределение ¹³⁷Cs в воде и донных отложениях Баренцева моря вдоль известного океанографического разреза «Кольский меридиан» (33°30' в.д.) в 2010–2013 гг. [15].

ским заливом по организации эстуарной экосистемы [10–12], но обойденное вниманием специалистов со времен чернобыльской катастрофы. В конце 1980-х и начале 1990-х годов радиоэкологические исследования проводились также в северо-западной части Черного моря – в своеобразном эстуарии

Особенно впечатляюще учения выглядели ночью, когда проводились стрельбы. Дорожки от трассирующих снарядов и сигнальных ракет уходили вдаль за горизонт. А наутро стало известно о гибели подлодки. Эта новость потрясла всех жителей поселка и военных, которые там базировались. Плакали и женщины, и даже взрослые мужчины.

Такое общее горе объединяло людей, наверно, только во времена Великой Отечественной войны... Поначалу верилось, что хотя бы часть экипажа получится спасти. Но чудеса не произошло. Траур в Мурманске и Североморске продолжался фактически до тех пор, пока на поверхность не подняли части подводной лодки и погибшую команду не предали земле.

Для определения экологических последствий этой страшной аварии Дмитрий Геннадьевич оперативно организовал экспедицию, и уже в сентябре 2000 г. научно-исследовательское судно «Дальние Зеленцы» отправилось к месту катастрофы. На тот момент было еще не ясно, есть ли утечка топлива из реакторов



Концентрация ¹³⁷Cs в промысловых рыбах в 1960–1990-е годы [15].

и какие уровни радиоактивного заражения будут установлены на морской поверхности. Участники экспедиции провели измерения радиоактивности в пробах воды, донных отложений и биоты. Баренцево море считается одним из самых продуктивных рыболовных районов в мире, поэтому очень важно было оценить, произошла ли утечка радиоактивного топлива, и если да, то как она повлияла на морскую экосистему. К счастью, уровень радиоактивности в поверхностных донных отложениях и в биоте не превысил значений, ранее измеренных в Баренцевом море. Исследователи установили, что

источниками радиоактивного загрязнения в этом районе служат глобальные поступления с морскими течениями от прибрежных установок по переработке ядерного топлива в Великобритании, а также «след» чернобыльской аварии. На момент отбора проб существенных утечек из атомной субмарины «Курск» выявлено не было. Именно эти данные и выводы, полученные в экспедиции Матишова, позволили военным не проводить консервацию подлодки и уже летом следующего года приступить к ее подъему.

Все эти работы как в северных, так и в южных морях позволили сформировать обширную базу данных по содержанию ^{137}Cs и ^{90}Sr в морской среде и биоте [14]. Исследователи визуализировали «скучные» цифровые данные базы с помощью ГИС-методов и атласных технологий, а также построили многочисленные карты и математические модели, позволяющие понять пространственное распределение радиоэлементов [15].

Использование инновационных для того времени технологий пробоотбора и лабораторной обработки проб, измерение радиоактивности, накопление в базах данных и визуализация полученного материала позволили Дмитрию Геннадьевичу и его коллективу проследить ранее не отмечавшиеся явления и закономерности в миграции радионуклидов по пищевым цепям в системах «вода — донные отложения» и «вода — лед» [14]. Вместе с коллегами Матишов разработал нетривиальные математические модели для оценки потоков искусственных радионуклидов в экосистеме Азовского моря [15].

Итогом этой кропотливой многолетней работы стало издание двух крупных трудов. В 2002 г. за книгу «Радиационная экологическая океаноло-



Д.Г.Матишов в командировке в Норвегии.

гия» [14] Матишов был награжден золотой медалью Президиума РАН, а англоязычная монография «Radioecology in Northern European Seas» [9], опубликованная в 2004 г. в ведущем научном издательстве «Springer», стала признанием весомого вклада российских ученых в данную область науки.

В 2001 г. Дмитрий Геннадьевич защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора географических наук «Антропогенные радионуклиды в морских экосистемах», а еще через два года он был избран в состав Российской академии наук, став при этом одним из самых молодых член-корреспондентов в ее истории (по Отделению наук о Земле).



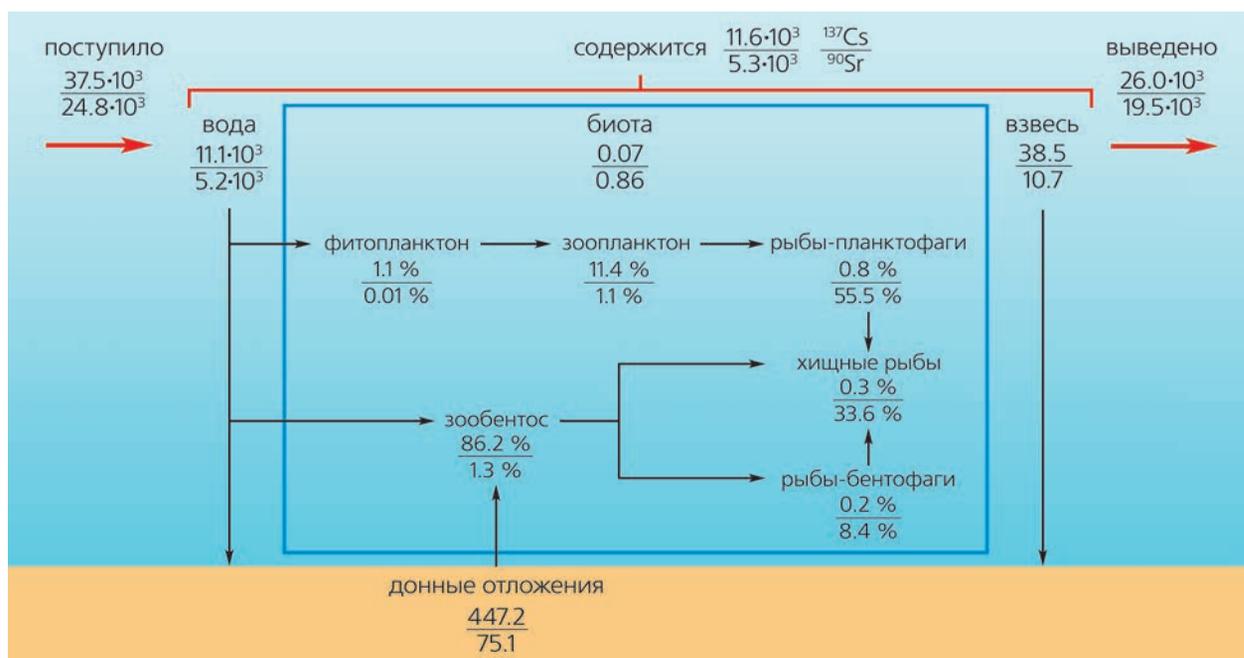
Экспедиционные работы в Азовском море. Июль 2003 г.

Концепция, разработанная Матишовым, продолжает совершенствоваться. Например, недавно был проведен сравнительный анализ многолетней динамики содержания и спектра техногенных радионуклидов в донных отложениях арктического шельфа [16]. По архивным и современным данным оценено радиоактивное загрязнение губ и заливов арктических морей, показан низкий современный уровень удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в поверхностном слое донных отложений. Максимальное накопление изотопов установлено в глубоководных частях желобов, где в составе осадков преобладает глинистая фракция. В 2012–2018 гг. радиоактивность осадков в прибрежье Баренцева моря была выше, чем в открытых районах, где региональные отличия незначительны. Наиболее заражены расположенные близко к источникам загрязнения заливы Кольский (губа Пала, район ФГУП «Атомфлот») и Мотовский (губы Западная Лица, Андреева) в Баренцевом море и Енисейский залив в Карском море. В губах южной части Баренцева моря концентрация ^{137}Cs составляет 1.5–3.0 Бк/кг, а ^{90}Sr — 0.6–1.9 Бк/кг. В ледовитых фьордах Шпицбергена, где наблюдается разгрузка талых ледниковых вод и нередко сходят айсберги, содержание ^{137}Cs возрастает до 3.0–6.5 Бк/кг, а ^{90}Sr — до 2.6–3.0 Бк/кг.

Ученым удалось доказать, что перенос атмосферных радионуклидов, накопленных многолетним морским льдом в «ядерную» эпоху, может быть вторичным источником загрязнения моря. Значи-

тельное снижение уровня радиационной загрязненности донных отложений в Баренцево-Карском регионе в XXI в. и сглаживание пространственных градиентов концентрации техногенных радионуклидов не отменяют необходимости в современных исследованиях. Сегодня мы наблюдаем, что интерес к освоению арктических экосистем неизменно растет, а факторы и источники загрязнения меняются.

В арктической морской воде основу спектра техногенных радионуклидов составляют изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr [17]. Рассмотрим, как формируется фон этих радионуклидов в Баренцево-Карском регионе. Исследования, проведенные в 2017–2018 гг., показали, что в свободных от инфраструктуры атомного флота губах Мурманского побережья (Ивановской, Териберской, Зеленецкой, Ярнышной, Порчнихе), а также в Кольском заливе (в губах Тоне и Белокаменной, в районах мысов Ретинского, Мишуково и Абрам) концентрации ^{137}Cs соответствовали уровню загрязненности вод прибрежного течения Баренцева моря и варьировали от 1.3 до 2.5 Бк/м³. В восточной части Баренцева моря, в районе Центральной впадины, Западно-Новоземельского, Гусиног, Новоземельского желобов и Северо-Восточного плато содержание ^{137}Cs в воде не превышало 1–2 Бк/м³. Концентрация ^{90}Sr в водах Баренцева моря составляла 0.4–3.7 Бк/м³. В Карском море наиболее загрязнены цезием и стронцием поверхностные воды прибрежной зоны южной и юго-западной частей, а в северной части загрязнение существенно ниже.



Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr (ТБк) в основных компонентах баренцевоморской экосистемы в начале 2000-х годов [15].

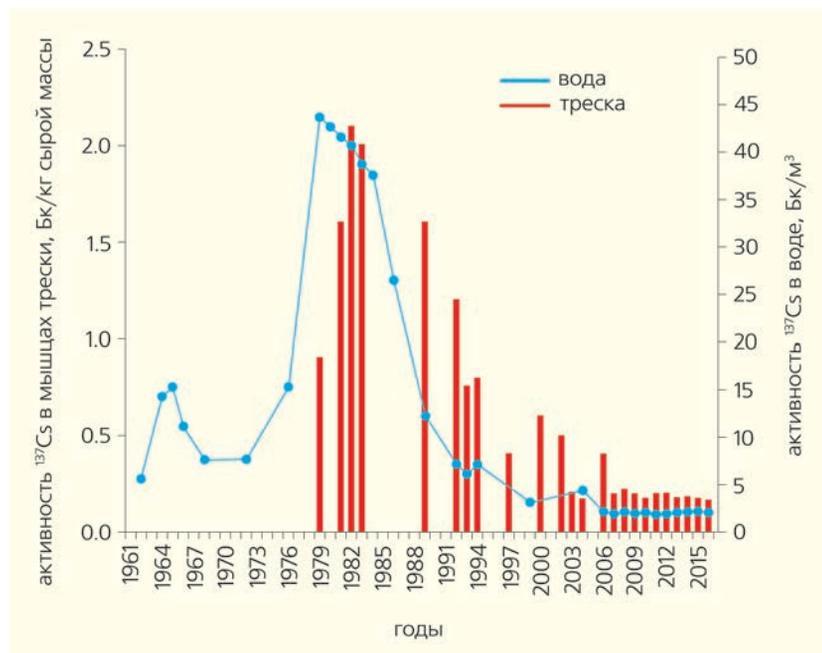


Д.Г.Матишов с представителями штаба Северного флота. Исследования морских радионуклидов ведутся в тесном сотрудничестве с российскими военными моряками.

Что касается рыб, водорослей-макрофитов и донных беспозвоночных Баренцева моря, то их загрязнение сегодня невелико. Концентрации техногенных изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr , начиная с периода максимального загрязнения в 1960-е и 1970-е годы, стабильно снижаются [17].

В 2017 г. нам удалось осуществить давнюю мечту Дмитрия Геннадьевича: организовать радиоэкологические исследования в районе Северного полюса [18]. В эту высокоширотную экспедицию отправилась группа ученых на ледоколе «50 лет Победы»*. Было выявлено, что современ-

* Подробнее см.: Матишов Г.Г. К Северному полюсу на атомном ледоколе «50 лет Победы» // Природа. 2018. №11. С.54–59.



Содержание ^{137}Cs в треске и морской воде Баренцева моря [15].

ная радиационная обстановка (по данным за 2013–2017 гг.) в Центральном полярном бассейне и в российских морях Северного Ледовитого океана в целом благополучна и отражает общее снижение влияния приоритетных ранее источников [19]. Установлены статистически значимые различия средней объемной активности ^{137}Cs в поверхностном слое вод. Оказалось, что загрязненность морской среды уменьшается в направлении с запада на восток. Максимальные концентрации ^{137}Cs характерны для Баренцева моря, в бассейне которого в XX в. разгружались трансграничные поступления западноевропейских радиохимических предприятий, а также проводились надводные и подводные ядерные взрывы, сбросы и захоронения ядерных отходов. Повышенный уровень загрязнения ^{137}Cs Карского моря сформировался преимущественно в результате поступления с речным стоком радиоактивных отходов с заводов Сибири. Меньше всего загрязнены воды морей Лаптевых и Восточно-Сибирского — наиболее удаленных от европейских источников техногенных радионуклидов [19].

В ММБИ КНЦ РАН продолжают работы по радиоэкологическим исследованиям птиц Баренцева и Азовского морей. Например, были определены различия в накоплении цезия в организмах барен-

цевоморских птиц разных видов в зависимости от их экологических особенностей [20]. Наибольшие концентрации ^{137}Cs (10.5–17.3 Бк/кг сырой массы) в печени обнаружены у чаек, за исключением бургомистров. Содержание радиоцезия в птицах других видов было невысоким — 3.0–5.3 Бк/кг сырой массы. Сопоставление данных по аккумуляции инкорпорированного в печени птиц ^{137}Cs с результатами изучения содержимого их желудков показало, что концентрация ^{137}Cs у птиц, питающихся в море, ниже, чем у тех, которые кормятся на суше [20]. Изучение птиц Азовского моря показало, что уровни удельной активности радиоактивных элементов ^{137}Cs и ^{90}Sr в костях и мышцах хохотуньи (*Larus cachinnans*) и большого баклана (*Phalacrocorax carbo sinensis*) были низкими и не отличались от ранее измеренных показателей. Следовательно, радиоактивное загрязнение местообитаний и кормовых объектов рыбоядных птиц восточной части Приазовья может считаться незначительным [21].

Дмитрия Геннадьевича уже пять лет нет с нами. Но остались ученики, научное направление и научная школа. Работы по радиационной экологической океанологии продолжают — как на севере, так и на юге нашей страны. Это наша дань памяти выдающемуся ученому, чье видение проблем науки во многом опередило свое время. ■

Исследование выполнено в рамках государственного задания №AAAA-A18-118122790121-5.

Литература / References

1. Smith J., Ellis K., Matishov G. et al. Radioactivity levels in Barents Sea sediments off Novaya Zemlya. Proceedings of International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic. Kirkenes, 1993; 37–43.
2. Matishov D., Szczypta E. Gamma emitters in the Barents Sea area. Proceedings of XX Polar Symposium. Lublin, 1993; 211–228.
3. Matishov G., Matishov D., Rissanen K. Peculiarities of radionuclide accumulation in benthic and fish of Barents and Kara Seas. Proceedings of International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic. Oslo, 1995.
4. Matishov G.G., Matishov D.G., Namjatov A.A. et al. Discharges of nuclear waste into the Kola Bay and its impact on human radiological doses. Journal of Environmental Radioactivity. 2000; 48: 5–21. DOI:10.1016/S0265-931X(99)00049-1.
5. Matishov G.G., Matishov D.G., Namjatov A.A. et al. Radioactivity near the sunken submarine “Kursk” in the Southern Barents Sea. Environmental science and technology. 2002; 36(9): 1919–1922. DOI:10.1021/es0112487.
6. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Риссанен К. Радиоактивное загрязнение Кольского залива Баренцева моря. Доклады Академии наук. 1996; 351(4): 571–573. [Matishov D.G., Matishov G.G., Rissanen K. Radioactive contamination of the Kola Bay (Barents Sea). Doklady Earth Sciences. 1996; 351(4): 571–573. (In Russ.)]
7. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Новые данные о радиоактивном загрязнении Черной губы (Новая Земля). Доклады Академии наук. 2002; 383(5): 14–16. [Matishov D.G., Matishov G.G. New data on radioactive contamination of the Chernaya guba (Novaya Zemlya). Doklady Earth Sciences. 2002; 383(5): 14–16. (In Russ.)]
8. Матишов Д.Г., Усягина И.С., Касаткина Н.Е., Павельская Е.В. Особенности накопления искусственных радионуклидов в элементах прибрежных экосистем Кольского полуострова. Доклады Академии наук. 2007; 413(5): 683–686. [Matishov D.G., Uсыagina I.S., Kasatkina N.E., Pavelskaya E.V. Accumulation peculiarities of artificial radionuclides in the elements of coastal ecosystems on the Kola Peninsula. Doklady Earth Sciences. 2007; 413(3): 448–451. DOI:10.1134/S1028334X07030294.]
9. Matishov D.G., Matishov G.G. Radioecology in Northern European Seas. Berlin, 2004.
10. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Антропогенные радионуклиды в донных отложениях Азовского моря. Доклады Академии наук. 1998; 363(5): 673–677. [Matishov D.G., Matishov G.G. Anthropogenic radionuclides in bottom sediments of the Sea of Azov. Doklady Earth Sciences. 1998; 363A(9): 1283–1287.]

11. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Лебедева Н.В. Содержание искусственных радионуклидов в птицах Баренцева и Азовского морей. Доклады Академии наук. 2003; 389(3): 424–426. [Matishov D.G., Matishov G.G., Lebedeva N.V. Content of artificial radionuclides in birds of the Barents and Azov seas. Doklady Earth Sciences. 2003; 389(3): 424–426. (In Russ.)]
12. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Касаткина Н.Е., Усягина И.С. Динамика радиоактивного загрязнения донных отложений Баренцева, Белого и Азовского морей. Доклады Академии наук. 2004; 396(3): 394–396. [Matishov D.G., Matishov G.G., Kasatkina N.E., Usyagina I.S. Dynamics of the radioactive pollution of bottom sediments of the Barents, White, and Azov seas. Doklady Earth Sciences. 2004; 396(4): 560–562.]
13. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н. Морская динамическая радиохемозология. М., 1986. [Polikarpov G.G., Egorov V.N. Marine Dynamic Radiochemoecology. Moscow, 1986. (In Russ.)]
14. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты, 2001. [Matishov D.G., Matishov G.G. Radiation ecological Oceanology. Apatity, 2001. (In Russ.)]
15. Матишов Д.Г., Бердников С.В., Касаткина Н.Е. Опыт применения математических моделей для оценки потоков искусственных радионуклидов в экосистеме Азовского моря. Современные информационные и биологические технологии в освоении ресурсов шельфовых морей. М., 2005; 184–197. [Matishov D.G., Berdnikov S.V., Kasatkina N.E. Experience in applying mathematical models for estimating artificial radionuclide flows in the Azov sea ecosystem. Modern Information and Biological Technologies in the Development of Resources of the Shelf Seas. Moscow, 2005; 184–197. (In Russ.)]
16. Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Кириллова Е.Э. Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков. Ч.2. Донные отложения. Наука Юга России. 2019; 15(4): 24–25. [Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S., Kirillova E.E. Dynamics of artificial radionuclides in the ecosystems of the Arctic ocean seas at the turn of XX–XXI centuries. Part 2. Bottom sediments. Science in the South of Russia. 2019; 15(4): 24–25. (In Russ.)]
17. Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Кириллова Е.Э. Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков. Ч.1. Морская вода и биота. Наука Юга России. 2019; 15(3): 12–23. [Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S., Kirillova E.E. Dynamics of artificial radionuclides in the ecosystems of the Arctic ocean seas at the turn of XX–XXI centuries. Part 1. Sea water and biota. Science in the South of Russia. 2019; 15(3): 12–23. (In Russ.)]
18. Матишов Г.Г., Клещанков А.В., Кириллова Е.Э. Результаты экспедиции на Северный полюс на ледоколе «50 лет Победы». Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019; 5: 131–140. [Matishov G.G., Kleshchenkov A.V., Kirillova E.E. Results of the expedition to the North pole on the icebreaker “50 let Pobedy”. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2019; 5: 131–140. (In Russ.)]
19. Матишов Г.Г., Касаткина Н.Е., Усягина И.С. Техногенная радиоактивность вод центрального полярного бассейна и смежных акваторий Арктики. Доклады Академии наук. 2019. 485(1): 93–98. [Matishov G.G., Kasatkina N.E. Usyagina I.S. Technogenic Radioactivity of Waters in the Central Arctic Basin and Adjacent Water Areas. Doklady Earth Sciences. 2019. 485(1): 288–292. DOI:10.1134/S1028334X19030073.]
20. Усягина И.С., Куклин В.В., Куклина М.М. Содержание искусственных радионуклидов в птицах Баренцева моря и их влияние на организм. Наука Юга России. 2019; 15(2): 59–69. [Usyagina I.S., Kuklin V.V., Kuklina M.M. The content of artificial radionuclides in birds of the Barents sea and their effect on the body. Science in the South of Russia. 2019; 15(2): 59–69. (In Russ.)]
21. Куклин В.В., Куклина М.М., Усягина И.С., Матишов Д.Г. Особенности физиолого-биохимического ответа рыбающих птиц на паразитарное заражение и загрязнение местообитаний в Восточном Приазовье. Наука Юга России. 2016; 12(1): 51–60. [Kuklin V.V., Kuklina M.M., Usyagina I.S., Matishov D.G. Features of the physiological and biochemical response of fish-eating birds to parasitic infection and pollution of habitats in the Eastern Azov region. Science in the South of Russia. 2016; 12(1): 51–60. (In Russ.)]

Radiation Environmental Oceanology

G.G.Matishov¹, O.V.Stepanyan¹

¹Southern Scientific Center, RAS (Rostov-on-Don, Russia)

Radiation environmental oceanology as a research area for the study of the World Ocean was founded by Dmitry Matishov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences. The article presents information about the formation of this research area in the 1990–2000's and the main achievements obtained over 20 years. It is shown that currently the sea water and bottom sediments of Russian European seas are characterized by low levels of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr, however in marine biota (fish, birds, and mammals) local excess of the level of radionuclides over the background values of the marine environment is possible.

Keywords: radiation environmental oceanology, radionuclides, Barents Sea, Sea of Azov, radioactive contamination.

Вековая история одной палеоботанической идеи

С.В.Наугольных

Геологический институт РАН (Москва, Россия)

Дан обзор находок листьев родов *Glossopteris* и *Pursongia* в пермских отложениях России в историческом ключе. Кратко рассмотрены основные проблемы систематики этих растений и их значение для палеофитогеографических реконструкций. Приведены представления автора об условиях образования местонахождений листьев *Pursongia* в верхнепермских отложениях, обнажающихся в бассейнах рек Малая Северная Двина и Сухона.

Ключевые слова: пермский период, палеоботаника, глоссоптерис, пурсонгия, Ангариды, Гондвана.

В науках о прошлом Земли время от времени складываются мифологемы, которые благодаря своей кажущейся логичности и стройности становятся очень популярными и широко тиражируются, в особенности журналистами и средствами массовой информации. Когда же появляются новые данные, меняющие или даже опровергающие такую мифологему, изменить ее чрезвычайно трудно. Такова и вековая история о «русских глоссоптерисах» профессора Владимира Прохоровича Амалицкого. Но с чего же в действительности началась эта история?

Магнетизм предконцепции

Вот цитата из одной книги моего палеонтологического детства, ее я частенько листаю просто для удовольствия, и стоит она на «золотой» полке моей библиотеки: *С неослабевающей энергией ученый продолжал поиски в последующие годы. Новая ценная находка обогатила его коллекции: в пермских слоях Амалицкий обнаружил хорошо сохранившиеся отпечатки листьев древних семенных растений – папоротников глоссоптерисов. Эти мощные древовидные растения также росли в пермское время в Южной Африке. Судя по отпечаткам, глоссоптерисы, жившие на севере, ничем не отличались от южноафриканских** [подчеркнуто мной. — С.Н.].

* Голосницкий Л.П. Путешествие в прошлое. М., 1957. С.60.



Сергей Владимирович Наугольных, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Геологического института РАН, профессор РАН; контрактная аффилиация — ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории стратиграфии Казанского федерального университета. Область научных интересов — палеоэкология, систематика и эволюция высших растений, изучение палеопочв.
e-mail: naugolnykh@list.ru

Именно так в сжатом виде и звучит миф о глоссоптерисах, найденных Амалицким в пермских отложениях на р.Северной Двине. Давайте попытаемся разобраться во всех деталях этой совсем не простой палеоботанической истории более чем вековой давности. Но сразу же сделаю оговорку: глоссоптерис — растение голосеменное, и никакого отношения к папоротникам он не имеет, вопреки не совсем грамотным сведениям в некоторых научно-популярных книгах.

В чем главная цель, или даже, если уместно так выразиться, идея этой статьи? Хочу в силу своих способностей показать прихотливость путей познания далекого прошлого Земли, и неоднозначность выводов, к которым может прийти исследователь, опираясь на внешнее сходство своих находок с широко известными окаменелостями. Конечно, нельзя винить предшественников в том, что результаты их исследований сейчас приходится пересматривать. Но и на современных ученых специфика палеонтологического знания накладывает

большую ответственность, требующую глубокого анализа и своих собственных данных, и результатов, полученных коллегами. Как увидит читатель, точка в истории изучения российских глоссоптерисов пока не поставлена, но и то, что мы знаем сейчас, позволяет по-новому взглянуть на историю позднепалеозойского растительного мира.

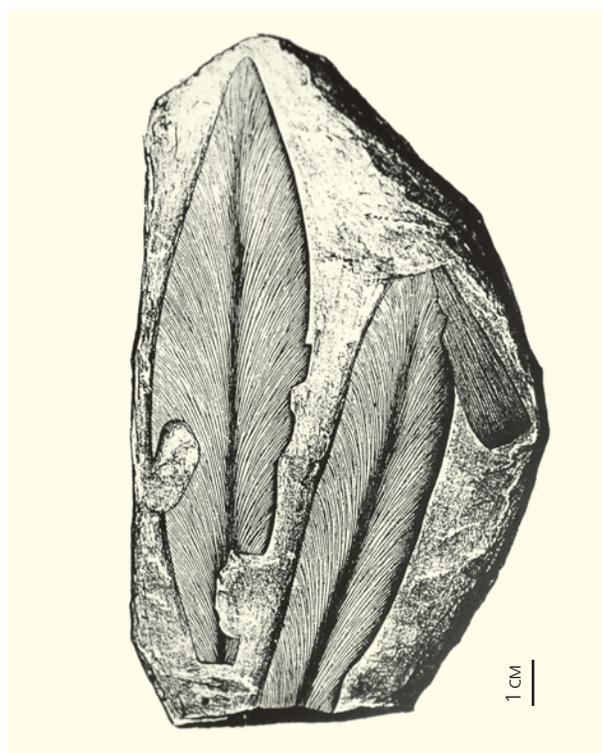
Клише «первое упоминание о “русских глоссоптерисах” принадлежит именно Амалицкому» широко распространено среди любителей палеонтологии. На самом деле впервые о находках листьев глоссоптериса в России за полвека до Амалицкого — в далеком 1840 г. — написал один из первых российских палеонтологов Г.И.Фишер фон Вальдгейм, основатель Московского общества испытателей природы. В своей работе Фишер фон Вальдгейм упомянул о находке листьев двух видов глоссоптериса: *Glossopteris phillipsii* и *G.crenulata* (второй вид был определен со знаком вопроса) в верхнепермских отложениях Оренбуржья, на Южном Урале [1]. Спустя десятилетие о находках *G.crenulata* написал выдающийся российский естествоиспытатель того времени К.Мерклин [2], специалист по ископаемым древесинам, работы которого получили мировую известность.

Таким образом, присутствие ископаемых листьев «глоссоптерисового» облика в пермских отложениях европейской части России и в Приуралье отмечалось отечественными учеными задолго до начала первых экспедиций Амалицкого. Надо полагать, что данные, опубликованные Фишером фон Вальдгеймом, вполне могли лечь в основу представлений Амалицкого о связях между Гондваной и Ангаридой, к западным пределам которой в пермском периоде относилась и нынешняя территория Европейской России. О возможности такой связи, кстати сказать, писал гениальный швейцарский геолог Э.Зюсс в фундаментальной трехтомной работе «Лик Земли» (1883–1888). У меня нет особых сомнений в том, что, работая в Санкт-Петербурге и Варшаве, Амалицкий не мог не ознакомиться с «Ликом Земли» и, более того, наверняка использовал его в своей преподавательской деятельности.

Зюсс в «Лике Земли» [3, р.389] специально останавливается на характеристике пермской биоты Южной Африки (центральной части Гондваны). Говоря о фауне позвоночных, попутно он вспоминал и о растениях, называя находки в песчаниках верхней части формации Кару (слои Бофорт) листьев *Glossopteris browniana* побегов хвощевидных *Phyllothea indica*. Листья и побеги филлотек отмечались и для каменноугольных и пермских отложений Ангариды, но эта тема, пожалуй, заслуживает отдельной статьи. В той же части книги Зюсс-

са, помимо упоминания южноафриканских глоссоптерид, присутствует указание на возможную синхронность пермских тиллитов (ледниковых отложений) Северо-Западной Европы (Англии) и Южной Африки.

Но не только от геологов поступали сведения о возможных связях северного континента Ангариды (Зюсс называл его континентом Ангара) с материками Гондваны. Так, в 1879 г. один из первых российских палеоботаников И.Ф.Шмальгаузен описал из нижнепермских отложений (по современным представлениям, из бургуклинской свиты) Тунгусского бассейна голосеменное растение, которое назвал *Zamiopteris glossopteroides*. Шмальгаузен не случайно дал новому растению видовой эпитет *glossopteroides*, т.е. имеющий сходство с глоссоптерисом. Действительно, листья нового растения имели языковидные или ланцетовидные очертания, оттянутое клиновидное основание, веерообразное жилкование с ложной средней жилкой или осевым пучком жилок, расположенным в средней (медиальной) части листа. Внешне эти листья действительно напоминали листья глоссоптерид. Здесь уместно отметить, что спустя шестьдесят лет после выхода в свет работы Шмальгаузена, из пеляткинской свиты Тунгусского бассейна были описаны листья *Pursongia tunguscana* [4], которые достовер-



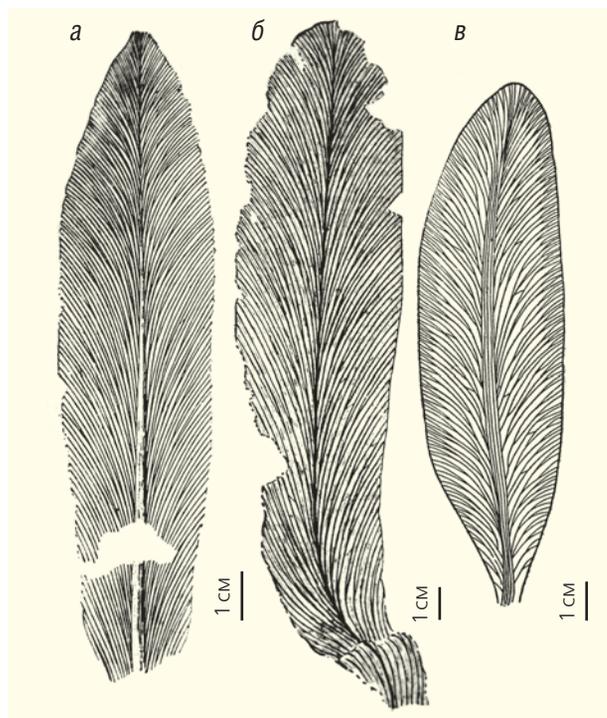
Листья *Zamiopteris glossopteroides* из нижнепермских отложений Тунгусского бассейна [23, табл.XIV, фиг.1].



Pursongia amalitzkii, один из экземпляров, найденных В.П.Амалицким в местонахождении Соколки. Образец из экспозиции Палеонтологического музея имени Ю.А.Орлова РАН, Москва.

но обладали анастомозами и, таким образом, вполне соответствовали диагнозу рода *Glossopteris*.

Продолжая отстаивать сходство позднепалеозойской ангарской флоры с флорой Гондваны, другой выдающийся российский палеоботаник М.Д.Залесский писал: *Siess исходил из той мысли, что развитие органической жизни на континенте Гондвана на юге и на континенте Ангара на севере, несмотря на присутствие между ними моря, могло следовать параллельно на обеих материках, так как для него уже было ясно некоторое отношение флоры Ангары к флоре Гондванского континента* [5, с.5]. И далее: *Настоящая работа является попыткой объединить в одно целое все элементы флоры, найденные на громадной площади Северной Азии из палеозойских осадков Зюссовского континента Ангара, элементы, по которым эта флора нам кажется родственной*



Листья пурсонгий из работ М.Д.Залесского: а — *Pursongia amalitzkii*, местонахождение Соколки, Малая Северная Двина [24, fig.2]; б — *Pursongia amalitzkii*, левый берег р.Сакмары у д.Кульчумкино, ст.Маячная [24, fig.1]; в — *Pursongia asiatica*, Кузбасс, д.Ишановка, кровля пласта Нового [25, фиг.23; 26, рис.24].

или сходной по характеру своему с гондванской флорой Индии и других частей гондванской суши и является, по-видимому, по возрасту пермской. В настоящее тревожное время, переживаемое этой страной, я принужден опубликовать только атлас этой интересной флоры в сопровождении объяснений к таблицам его, но, когда в стране представится возможность более спокойной работы, за ним последует текст, в котором будет представлено как описание изображенной флоры, так и критическое ее изучение, а затем будут приведены те геологические выводы, к которым можно прийти из сравнительного изучения ее со сходными флорами [5, с.6]. К вопросу о связях ангарской и гондванской флор Залесский обращался неоднократно [6–9].

В 1918 г. Залесский, конечно же, не догадывался, что Россию ждут еще более суровые испытания и что сам он будет интернирован 24 июля 1943 г. из Орла, где он тогда жил и трудился, в фашистскую Германию, в Берлин, в Имперский институт изучения почв, и что домой он сможет вернуться только после окончания войны*.

* Сорокина М.Ю. Наука и Третий рейх: борьба за ресурсы // Природа. 2003. №8. С.73–80.

Показательно, что в работе 1918 г. Залесский перенес вид *Zamiopteris glossopteroides* непосредственно в состав гондванского рода *Gangamopteris*, считая, что листья из Тунгусского бассейна обладают анастомозами, характерными для глоссоптерид [5, с.24].

Однако по мере изучения пермских флор Ангариды морфологическое своеобразие и особенности строения ангарских растений все больше бросались в глаза Залесскому, поэтому часть видов из ранее определявшихся гондванских таксонов он отнес к новым родам. Так, для ланцетовидных листьев из верхнепермских отложений севера Европейской платформы и сходных с ними листьев Приуралья и Сибири Залесский предложил новый род *Pursongia*. Пурсонгия, тем не менее, рассматривалась Залесским в составе порядка Glossopteridales.

Новые взгляды

К проблеме родственных связей и таксономического положения рода *Zamiopteris* и морфологически близких к нему растительных остатков в середине 60-х годов прошлого века обратился С.В.Мейен, известный палеоботаник и эволюционист. Мейен предложил дополненный и исправленный диагноз рода *Zamiopteris* [10, с.86], в котором подчеркнул отсутствие анастомозов между жилками и конспективно привел эпидермально-кутикулярные признаки рода. В указанной статье он справедливо отметил, что нет никакой гарантии, что эпидермально-кутикулярное строение типового вида *Zamiopteris glossopteroides* из перми Тунгусского бассейна и описанного им нового вида *Z.neuburgiana* было однотипным, поэтому нет уверенности, что эти два вида действительно принадлежали к одному и тому же роду. Правда, при этом эпидермально-кутикулярные признаки *Z.neuburgiana* почему-то с легкостью были перенесены в расширенную диагностику рода *Zamiopteris*. Таким образом, в словах Мейена и принятом им таксономическом решении наблюдается очевидное противоречие.

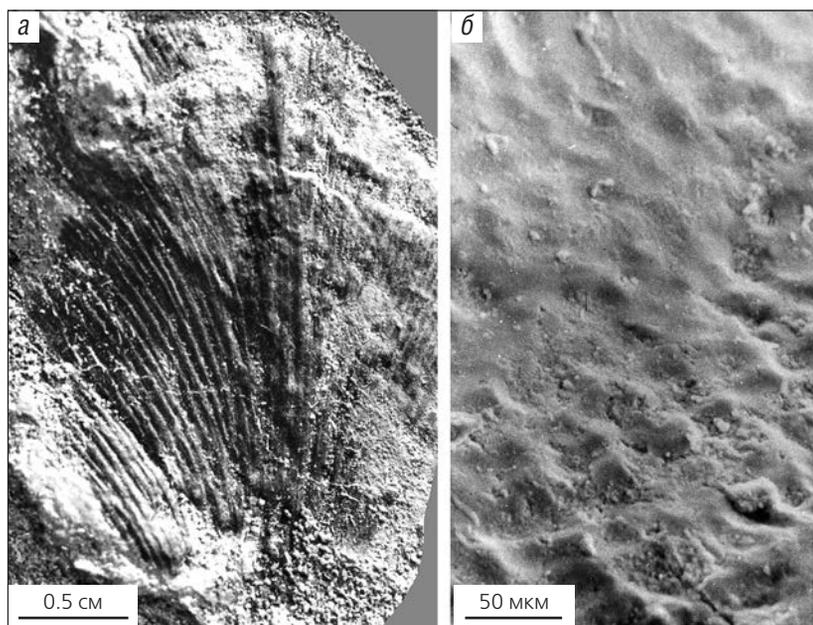
Мейен сблизил род *Zamiopteris* с кордаитами, однако из описания как макроморфологических, так и эпидермально-кутикулярных признаков вида *Z.neuburgiana* это никак не следует. На мой взгляд, *Zamiopteris* — это го-

лосеменное растение, родственное пурсонгиям, но более древнее и менее эволюционно продвинутое. Фрагментарные листья, описанные Мейеном как *Zamiopteris* sp.1 и *Zamiopteris* sp.2, по моему мнению, не могут быть отнесены к этому роду. Скорее это плохо сохранившиеся кордаитоподобные листья рода *Ruffloria*.

В той же работе Мейен подробно остановился и на статусе рода *Pursongia*. Вот цитата из его работы: *Сразу оговоримся, что типовой материал Pursongia не сохранился, нет и его фотоизображений. Поэтому составить представление об облике листьев, относимых Залесским к Pursongia, можно только по образцам (с этикетками Залесского), имеющимся в Центральном геологическом музее имени Ф.Н.Чернышева в Ленинграде и в Палеонтологическом музее имени Ю.А.Орлова в Москве* [10, с.93].

Мейен доказал, что пурсонгиеподобные листья из верхней перми Русской платформы и Приуралья, которые он относил к особому роду *Tatarina*, ассоциативно связаны с репродуктивными органами *Peltaspermum* в форме семенных дисков — пельтоидов, что доказывало принадлежность этих растений к семейству Peltaspermaceae порядка Peltaspermales, который сейчас нередко обособляют в отдельный класс Peltaspermopsida.

В отношении номенклатуры пурсонгиеподобных листьев необходимо отметить, что Мейен и его последователи попали в очень коварную логическую ловушку. Если мы признаем, что каж-



Пурсонгия из местонахождения Завражье: а — *Pursongia* sp., лист, ассоциативно связанный с семеносными органами *Peltaspermum polyspermis*; б — эпидермально-кутикулярное строение семеносного диска *P.polyspermis*.

дая специфическая форма сохранности или каждая новая возможность наблюдать какую-то особую группу признаков, недоступную для наблюдения на типовом экземпляре, — достаточное основание для введения в палеоботаническую номенклатуру новых таксонов (в данном случае — на уровне рода), то тогда мы открываем самый настоящий номенклатурный ящик Пандоры. К такой ситуации вполне подходит еще один метафорический образ — выпускание злобного джинна из бутылки, ведь в таком случае каждый желающий самоутвердиться на почве таксонов творчества получает формальные и легальные основания для неконтролируемой деятельности. Именно поэтому, когда в мое распоряжение попали ланцетовидные листья из верхнепермских отложений, обнажающихся у г. Вязники (Владимирская обл.), с жилкованием, характерным для пурсонгий, и с хорошо сохранившимися кутикулами [11], я описал их в качестве нового вида рода *Pursongia*, отдавая законный приоритет в изучении этого рода Залесскому. Заслуги Мейена в изучении ланцетовидных листьев из верхней

перми Русской платформы и Приуралья отражены в видовом названии нового растения — *Pursongia meyenii*.

История изучения рода *Pursongia* со всеми перипетиями, которые ее сопровождали, проанализирована мной в отдельной статье, вошедшей в юбилейный золотой (пятидесятый!) том международного журнала «Palaeobotanist» [12], поэтому здесь ее повторять не буду. Но основные выводы необходимо кратко обсудить.

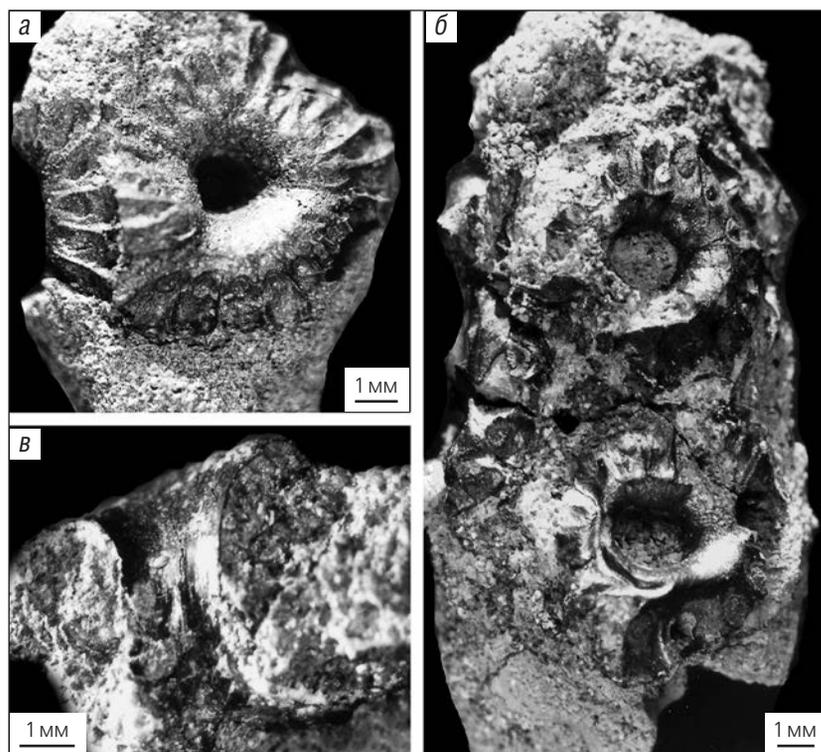
Какими были глоссоптериды?

Роду *Glossopteris* и его ближайшим родственникам посвящен гигантский массив литературы, так что привести даже краткий ее обзор в научно-популярной статье совершенно невозможно. Желающих окунуться в тему можно переадресовать к моему очерку, опубликованному несколько лет назад на страницах «Природы»*.

Собственно говоря, род глоссоптерис был первоначально предложен только для ланцетовидных листьев с характерным сетчатым жилкованием,

образованным жилками, вееро-видно расходящимися от осевого пучка жилок или от так называемой ложной средней жилки, и с анастомозами, соединяющими соседние жилки. Было описано огромное количество видов глоссоптерисов с самыми разными вариантами жилкования, в основе своей все же повторяющих базовую схему. Жилки могли быть и тонкими, и потолще, расходящимися к краям листа под разными углами. Анастомозы могли располагаться чаще или реже. И даже форма листа могла меняться от лентовидной до широкоязыковидной. Однако общий облик листьев, как правило, сразу давал понять исследователю, ископаемые остатки какого именно растения он нашел, неважно, случилось ли это в Индии, Африке, Южной Америке, Австралии или даже Антарктиде.

Репродуктивные органы глоссоптерисов (и глоссоптерид в целом) тоже имели более или менее



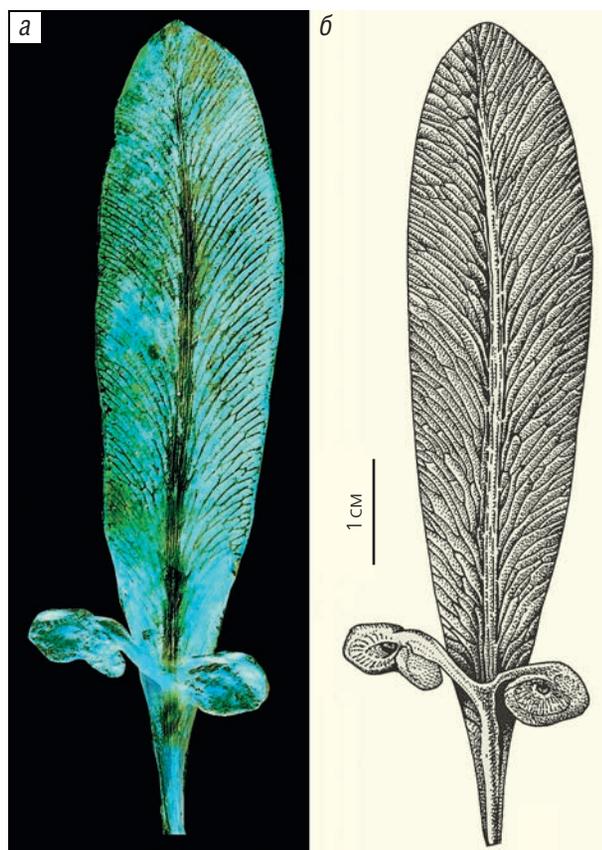
Строение женских репродуктивных органов *Peltaspermum polyspermis*, принадлежавших пельтаспермовому с листьями *Pursongia* sp. из местонахождения Завражье: а — два соседних семенных диска, один из которых виден полностью, на радиальных секторах хорошо сохранились овальные семенные рубцы; б — фрагмент кистевидного собрания семенных дисков; в — продольное сечение через ножку и основание семенного диска, сохранившихся в форме отпечатков.

* Наугольных С.В. Символ Гондваны // Природа. 2012. №12. С.49–59.



Глоссоптериды из верхнепермских отложений Австралии (угольное месторождение Иллавара, бассейн Данеду, Новый Южный Уэльс): *а* — раскрытый семенной орган; *б, в* — листья *Glossopteris* sp.: *б* — сетчатое жилкование с анастомозами, *в* — общий вид листа, *г* — семенной орган *Partha* sp.

общий план строения. И семенные (женские), и производящие пыльцу (мужские) органы глоссоптерид прикреплялись к осевой части листа, образуя так называемые фертилигеры. Женские фертилигеры могли продуцировать либо большое количество мелких семян, падавших непосредственно рядом с материнским растением, либо несколько крупных семян, снабженных крылаткой, которые могли переноситься ветром на большее расстояние от места исходного произрастания. По моему мне-



Реконструкция расположения семенного органа *Partha* sp. на листе *Glossopteris* sp.: *а* — комбинированная фотография листа, *б* — реконструкция, рисунок автора.

нию, это было связано с различной репродуктивной стратегией глоссоптерид. Часть из них была адаптирована к широкому расселению в условиях низкой конкуренции за ресурсы, а другая — к максимально большому производству диаспор в условиях плотного заполнения экологических ниш в растительном сообществе. Этот, по своей сути поведенческий, этологический феномен получил название «супраидеоадаптация» [13]. По форме роста среди глоссоптерид были и кустарники, и высокие деревья. Многие глоссоптериды, по всей видимости, стали важными углеобразователями на материках Гондваны.

Среди растений, отнесенных Залесским и другими палеоботаниками к роду *Pursongia*, оказались как листья без анастомозов (такие, как типовой вид рода *P.amalitzkii*), только внешне сходные с глоссоптеридами, так и листья с анастомозами (например, *P.asiatica* или *P.tunguscana*). Решить проблему установления точного таксономического положения ангарских пурсонгий с анастомозами, не располагая данными о репродуктивных органах, пока не представляется возможным.

Если кратко резюмировать значение различий пурсонгий и настоящих глоссоптерисов, то прежде всего следует отметить два момента. Во-первых, пурсонгии не имеют никакого отношения к глоссоптерисам, они принадлежат к совершенно иной группе голосеменных (а именно к пельтаспермовым) и не могут служить свидетельством в пользу палеофитогеографических связей между Гондваной и Ангаридой, как это предполагалось вначале. Во-вторых, при этом присутствие настоящих *Glossopteris* в пермских отложениях Сибири, Дальнего Востока и Монголии доказывает, что миграционные обмены между Гондваной и Ангаридой в течение пермского периода все-таки имели место. Вот такой удивительный зигзаг претерпели наши представления о пермских флорах России.

Немного тафономии

Рассмотренные выше проблемы органично связаны с вопросом формирования местонахождений, в которых были найдены листья пурсонгий. Все-таки не будем забывать, что внимание палеонтологической общественности к этим растениям было привлечено прежде всего раскопками Амалицкого и открытием знаменитой северодвинской фауны тетрапод с иностранцевиями, скутозаврами, двиниями, котлассиями, карпинскиозаврами и другими палеонтологическими чудесами. Казалось бы, нет такого палеонтолога, изучающего пермскую систему, который так или иначе не соприкоснулся бы с изучением отложений этого возраста, обнажающихся в бассейнах Сухоны и Северной Двины. Однако загадок и противоречий в существующих представлениях об образовании местонахождений наземных растений и тетрапод, расположенных в этом регионе, еще очень много.

Сложность ситуации с родами *Glossopteris* и *Pursongia* подчеркивается непростыми, а подчас и драматичными событиями в жизни исследователей, которые соприкоснулись с изучением этих вымерших растений. Выяснилось, что даже ошибочная гипотеза может быть полезна, если она основана на тщательно проработанных фактах. Как тут не вспомнить утверждение И.Канта, что *и в самом деле, явления при самом схватывании их суть не что иное, как эмпирический синтез (в пространстве и времени), и, следовательно, даны только в этом синтезе**.

Как этот абзац связан с предыдущим обсуждением и с тафономией местонахождений пурсонгий? Как помнит читатель, Амалицкий именно пурсонгий (которых он считал глоссоптерисами)

использовал в качестве одного из доказательств континентальных связей европейской части России (т.е. западных пределов Ангариды) с Гондваной в пермском периоде. Но стало ясно, что пурсонгии и глоссоптерисы — существенно разные растения. Однако дальнейшее изучение пермских флор Ангариды показало, что глоссоптериды в них все-таки есть! Подробнее об этом поговорим чуть позже. Таким образом, в пермском периоде связи между Гондваной и Ангаридой имели место. Вот он, эмпирический синтез Канта, но на палеонтологическом материале.

Продолжая эту мысль, неизбежно нужно будет разобраться с тем, как именно, в ходе каких процессов в пространстве и времени, листья пурсонгий сохранились в пермских песчаниках Сухоны и Северной Двины и почему они оказались захороненными вместе с остатками иностранцевий и скутозавров.

Мои представления о тафономии и условиях захоронения листьев пурсонгий в местонахождениях Соколки и Завражье (тех самых, которые изучал Амалицкий на рубеже XIX и XX вв.) сложились благодаря материалам, собранным московскими любителями палеонтологии в начале 1990-х годов и переданным мне для научной обработки. Коллекция была вполне представительной. Начав ее изучение, я обратил внимание на следующее.

Во-первых, и в Соколках, и в Завражье листья пурсонгий часто располагались не строго параллельно плоскости напластования, а были подвернуты и смяты в процессе перемещения вместе с песчано-глинистым материалом, взвешенным в мощном водном потоке. При этом иногда встречались листья, прикреплявшиеся к общему укороченному побегу, т.е. к брахибласту. Во-вторых, в местонахождении Завражье вместе с листьями были найдены и репродуктивные органы пурсонгий, причем представлены они были не отдельными изолированными семеносными дисками, как это обычно бывает, а целыми собраниями — агрегатами из нескольких пельтоидов, прикреплявшихся к общей фертильной оси и формировавших некое подобие шишки — стробила.

Эти наблюдения определенно указывают на то, что листья вместе с репродуктивными органами попали в поток довольно быстро, были сорваны ветром, ливнями или даже самим потоком непосредственно с живого растения и затем, после некоторого переноса, были захоронены вместе с песчаным материалом. Поэтому важно вспомнить указание Амалицкого на то, что в Соколковской линзе листья пурсонгий встречались преимущественно в верхней части линзы, а скелеты тетрапод

* Кант И. Критика чистого разума. Минск, 1998. С.534.

(в особенности крупных форм — хищных иностранцев и растительноядных парейазавров) — в нижней. Это свидетельствует о градиционной сегрегации органических остатков в потоке в процессе их перемещения. Тяжелые остатки погружались в нижнюю часть потока, а более легкие оставались в верхней части потока, на плаву.

Твердо убежден в том, что весь поток был одномоментным, и, соответственно, вся толща песков линзы и в Соколках, и в Завражье образовалась за очень короткое время, за считанные дни, а может быть, даже и часы. Скелеты погружались на дно вместе с мягкими тканями, и разложение этих тканей совместно с деятельностью организмов-деструкторов (прежде всего бактерий) привело к образованию мощных конкреций вокруг скелетов и отдельных костей. Именно поэтому мне представляется более правильным сравнивать отложения линз Соколок и Завражья не с русловым или старичным аллювием, а с пролювиальными образованиями, т.е. с отложениями временных, но катастрофических по масштабам водотоков.

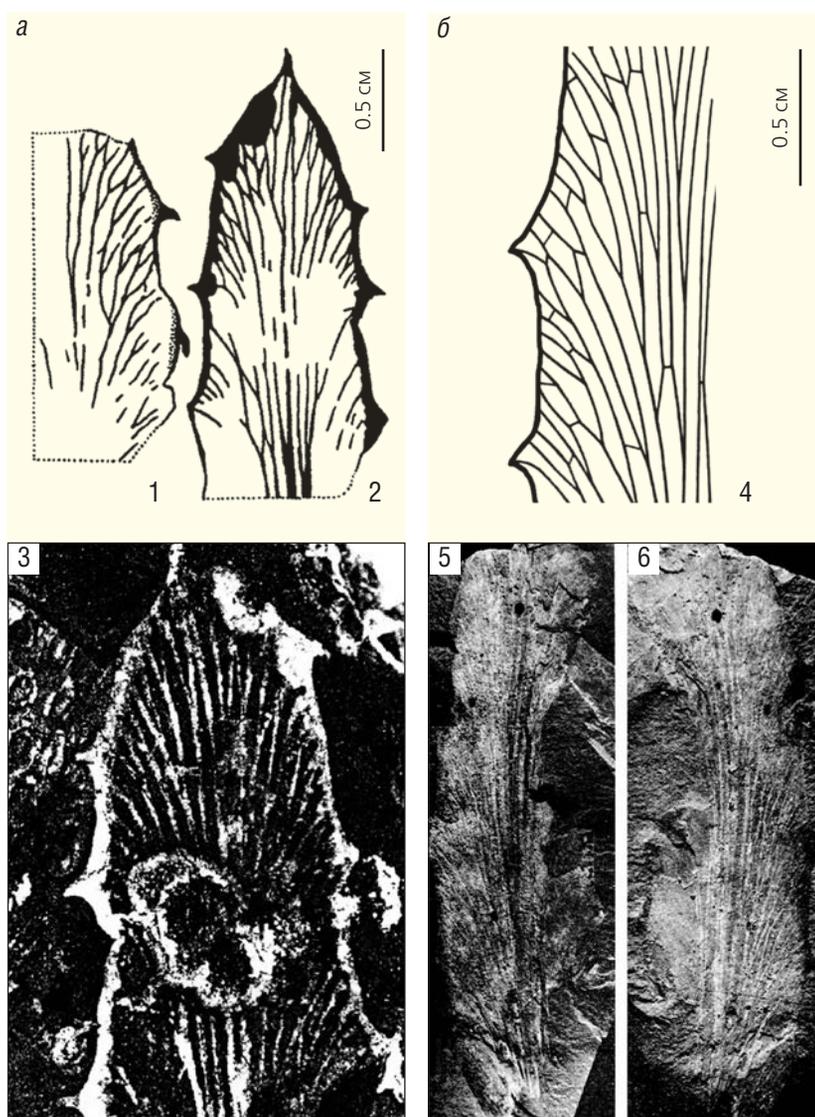
* * *

Казалось бы, выявленные различия в анатомическом строении классических пурсонгий и глоссоптерид свидетельствуют о том, что гипотеза о связях флор Гондваны и Ангариды себя исчерпала. Но это не так.

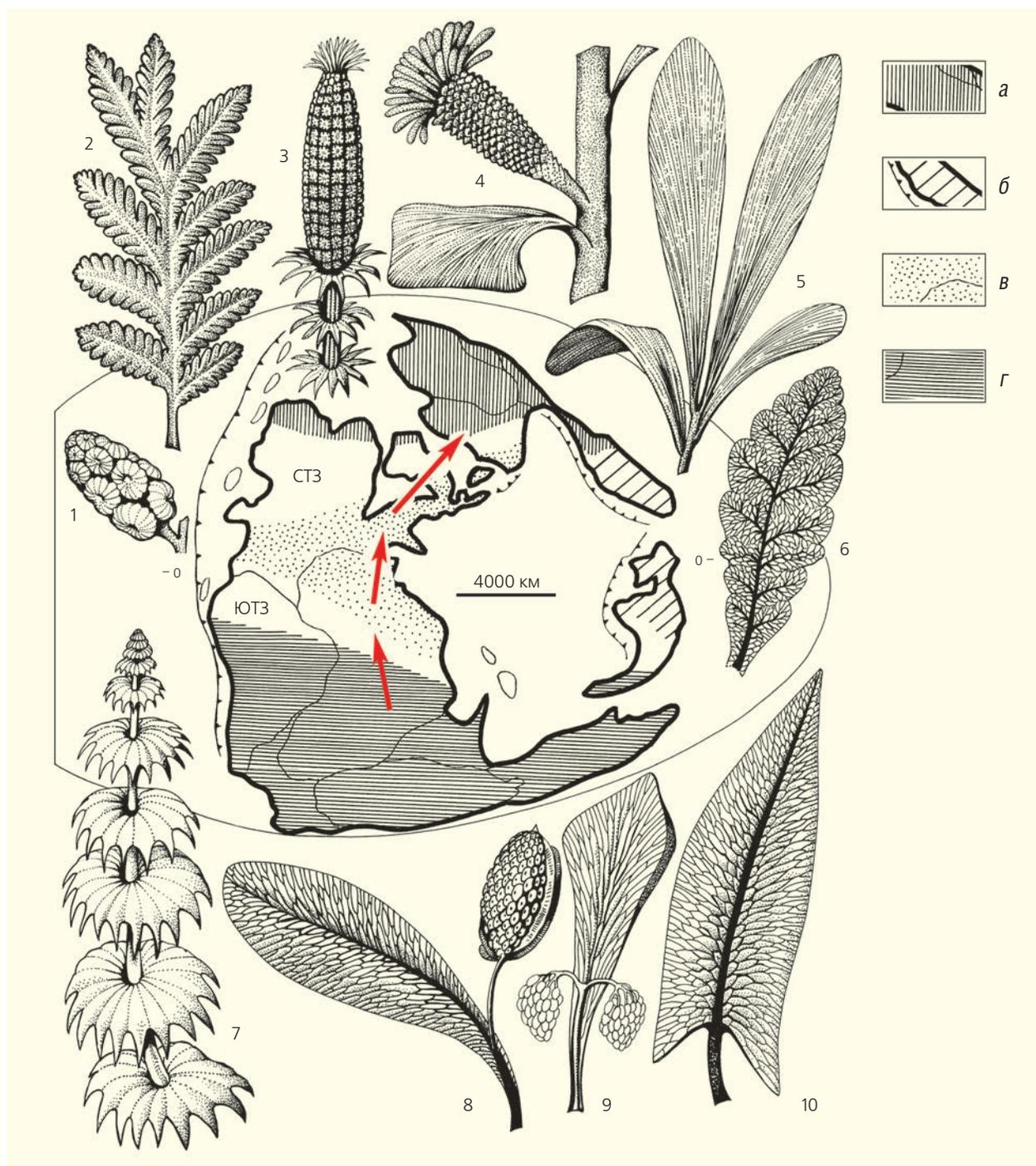
Удивительным и красноречивым доказательством связей флор древних континентов Ангариды и Гондваны служит находка в отложениях полдарской свиты (северодвинский ярус верхней перми, согласно современной стратиграфической номенклатуре), которые обнажаются в разрезах Опоки и Никулино (Вологодская обл., Великоустюжский р-н, бассейн р.Сухоны), очень необычного растения, отнесенного к новому роду и виду *Acanthopteridium spinimarginale* [14]. Это растение очень похоже на вид *Ilexoidephyllum permicum*, описанный ранее из пермских отло-

жений бассейна р.Параны (Южная Америка) [15]. Единственное и не очень существенное различие — форма верхушки, которая у акантоптеридиума обычно приостренная, а не лопатчатая (или закругленная), как у илексойдефиллума. И кстати, у обоих растений между жилками присутствуют отчетливые и несомненные анастомозы.

Настоящие глоссоптериды были обнаружены в пермских отложениях юго-восточных пределов Ангариды: в Монголии (о новых находках и обзор проблемы см. [16]), Северном Китае [17] и на Дальнем Востоке [18–20]. Это позволяет считать доказанным существование миграционных связей между Гондваной и Ангаридой.



Общие флористические элементы во флорах Западной Ангариды — *Acanthopteridium spinimarginale* (а): (1, 2 — прорисовка жилкования; 3 — фотография листа, противотпечаток которого прорисован на 2) и Гондваны — *Ilexoidephyllum permicum* (б): 4 — прорисовка жилкования, 5, 6 — фотографии листьев (фиг.4–6 по [15]).



Палеофитогеография пермского периода. Растения: 1 — собрание семенных дисков *Peltaspermum*; 2 — лист (вайя) пельтаспермового птеридосперма *Permocallipteris*; 3 — фертильная зона хвощевидного *Tchernovia*; 4 — латеральный стробил войновскиевского *Vojnovskya*; 5 — побег войновскиевского с листьями *Ruffloria*; 6 — лист (вайя) птеридосперма из группы гигантоптерид *Gigantopteris*; 7 — побег хвощевидного *Raniganjia*; 8 — женский репродуктивный орган глоссоптерид *Scutum*; 9 — мужской репродуктивный орган глоссоптерид *Eretmonia*; 10 — лист *Belemnopteris*. Морфология растений дана по разным авторам, с изменениями и дополнениями. Условные обозначения: а — зона развития бореальной растительности ангарского типа; б — зона развития влаголюбивой тропической растительности катазиатского типа; в — зона развития сухолюбивой тропической растительности еврамерийского типа; г — зона развития нотальной растительности гондванского типа. Красными стрелками показано возможное направление миграции гондванских элементов в западные пределы Ангариды. СТЗ — северная тропическая зона; ЮТЗ — южная тропическая зона.

Гондванские элементы могли перемещаться в северном направлении по периферии древнего океана Тетис. Возможность таких миграций была обусловлена флуктуациями климата, при которых растения, приспособленные к относительно суровым сезонно холодным условиям, могли проникать в регионы, занятые низкоширотной растительностью.

О широких миграционных обменах между соседними палеофлористическими областями писали многие палеоботаники. В пермских отложениях Омана (Аравийский п-ов) было обнаружено удивительное смешение гондванских, катазиатских и еврамерийских элементов, которое можно было объяснить, только допустив миграцию исходных видов по периферии Тетиса [21]. О таких же масштабных миграционных обменах между Анаридой и Катази-

ей писали китайские палеоботаники [22]. Остались ли еще какие-то нерешенные вопросы в более чем вековой истории с родами *Glossopteris* и *Pursongia*? Да, остались.

Вот самый главный: какие же все-таки репродуктивные органы были связаны с ангарскими (юго-восточно-ангарскими) глоссоптеридами? Такие органы пока неизвестны. Возможно, они уже лежат где-то в лотках с образцами, собранными геологами-съемщиками, но профессиональные палеоботаники до них пока еще просто не добрались. Но возможно эти находки, погребенные в темноте углистых сланцев и песчаников в глубинах Земли, еще ждут своих первооткрывателей. И, кто знает, может быть, кому-то из читателей этой статьи удастся их найти. ■

Литература / References

1. Fischer von Waldheim G.N. Nachtrag zu Hrн. Major von Qualens geognostischen Beyträgen zur Kenntniss des westlichen Urals. Bulletin de la Société impériale des naturalistes de Moscou. 1840; (IV): 488–494.
2. Mercklin C. Verzeichnis aller in Russland bis jetzt (November 1852) aufgefundenen beschriebener, unbeschriebener oder zweifelhafter fossiler Pflanzen. Mémoires physique et chimie de l'Académie de Sciences. 1852. 1: 497–504.
3. Suess E. The face of the Earth. Oxford, 1904.
4. Нейбург М.Ф. Опыт флоростратиграфического сопоставления верхнепалеозойских отложений Ангариды и Гондваны (Индия). Вопросы геологии Азии. 1954; 1: 767–797. [Neuburg M.F. Phytostatigraphic correlation of the Upper Paleozoic deposits of Angaraland and Gondwana (India). Problems of Asian geology. 1954; 1: 767–797. (In Russ.).]
5. Залесский М.Д. Палеозойская флора Ангарской серии: Атлас. Пр., 1918 (Труды Геологического комитета. Новая серия; Вып.174). [Zallessky M.D. Paleozoic flora of the Angara Series. Atlas. Petrograd, 1918. (Transactions of the Geological Committee. New Series, Iss.174). (In Russ.).]
6. Залесский М.Д. О *Cordaites aequalis* Göppert из Сибири и о тождестве его с *Neggerathiopsis hislopii* Bunbury sp. флоры Гондваны. СПб., 1912. (Труды Геологического комитета. Новая серия; Вып.86). [Zallessky M.D. On *Cordaites aequalis* Göppert from Siberia and on its identity with *Neggerathiopsis hislopii* Bunbury of the Gondwana flora. Saint-Peterburg, 1912. (Transactions of the Geological Committee. New Series, Iss.86). (In Russ.).]
7. Залесский М.Д. Гондванская флора бассейна реки Печоры. 1: Река Адзья. Екатеринбург, 1914; 55–85 (Записки Уральского общества любителей естествознания. Т.33). [Zallessky M.D. Gondwana flora of the Pechora River basin. I: The River Adzva. Ekaterinburg, 1914; 55–85 (Annals of the Ural's Society of Naturalists. V.33). (In Russ.).]
8. Залесский М.Д. Пермская флора Уральских пределов Ангариды: Атлас. Л., 1927 (Труды Геологического комитета. Новая серия; Вып.176). [Zallessky M.D. Permian flora of the Uralian limits of Angaraland. Atlas. Leningrad, 1927 (Transactions of the Geological Committee. New Series, Iss.176). (In Russ.).]
9. Залесский М.Д. Распространение ископаемой флоры, родственной гондванской, в пределах северной части Евразии. Известия Академии наук. VII серия. Отделение математических и естественных наук. 1930; (9): 913–930. [Zallessky M.D. Distribution of the fossil flora, related to Gondwana flora, in the limits of northern part of Eurasia. Reports of the Academy of Sciences. VII Serie. The department of mathematical and natural sciences. 1930; (9): 913–930. (In Russ.).]
10. Мейен С.В. О роде *Zamiopteris* Schmalhausen и его соотношении с некоторыми смежными родами. Птеридоспермы позднего палеозоя и мезозоя. М., 1969; 85–104. (Труды Геологического института РАН, Вып.190). [Meyen S.V. On the genus *Zamiopteris* Schmalhausen and its relationship with some neighboring genera. Pteridosperms of Late Paleozoic and Mesozoic. Moscow, 1969; 85–104. (Transactions of the Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Iss.190). (In Russ.).]
11. Наугольных С.В. Вязниковская флора и природа пермо-триасового вымирания. Причинно-следственные связи и факторы глобальных биосферных перестроек в фанерозое. М., 2006; 42–71. (Труды Геологического института РАН, Вып.580). [Naugolnykh S.V. The Vjazniki flora and the nature of Permian-Triassic extinction. Causal-consequential connections and factors of the Phanerozoic biospheric reorganization. Moscow, 2006; 42–71. (Transactions of the Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Iss.580). (In Russ.).]
12. Naugolnykh S.V. A new peltaspermeaceous pteridosperm from the Upper Permian of the Russian platform. The Palaeobotanist. 2001; 50: 189–205.

13. Naugolnykh S.V. Basic reproductive strategies of glossopterids: supraidoadaptive divergence from the viewpoint of a non-Gondwana palaeobotanist. *The Palaeobotanist*. 2016; 65: 1–17.
14. Наугольных С.В., Арефьев М.П. Новое загадочное растение из верхней перми Субангариды. Доклады международного симпозиума «Верхнепермские стратотипы Поволжья». М., 1999; 283–295. [Naugolnykh S.V., Arefiev M.P. A new enigmatic plant from the Upper Permian of Subangaraland. Reports of International symposium “Upper Permian stratotypes of the Volga River”. Moscow, 1999; 283–295. (In Russ.)]
15. Rohn R., Rösler O. Folhas denteadas da Farmacao Rio do Rasto (Bacia do Parana, Permiana Superior) e seu possivel Significado paleoclimatico. *Boletin de Instituto Geologico*. 1989; (7): 127–137.
16. Naugolnykh S.V., Uranbileg L. A new discovery of *Glossopteris* in southeastern Mongolia as an argument for distant migration of Gondwanan plants. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018; 154: 142–148.
17. Yang T., Naugolnykh S.V., Sun G. A new representative of *Neocalamites* Halle from the Upper Permian of Northeastern China (Jiefangcun Formation). *Paleontological Journal*. 2011; 45(3): 335–346.
18. Зимина В.Г. Первая находка *Glossopteris* и *Gangamopteris* в пермских отложениях Южного Приморья. Вопросы геологии и рудоносности Дальнего Востока. Тезисы докладов на юбилейной сессии Дальневосточного геологического института ДВ филиала СО АН СССР, посвященной пятилетию института. Владивосток, 1965; 49–50. [Zimina V.G. First find of *Glossopteris* and *Gangamopteris* in the Permian deposits of the Southern Primorie. Problems of geology and mine resources of the Far East. Abstracts of communications for Anniversary Session of the Far East Geological Institute of FE filial of the Siberian Section of the Academy of the USSR, dedicated to the 5th anniversary of the institute. Vladivostok, 1965; 49–50. (In Russ.)]
19. Зимина В.Г. О *Glossopteris* и *Gangamopteris* из пермских отложений Южного Приморья. Палеонтологический журнал. 1967; (2): 113–121. [Zimina V.G. On *Glossopteris* and *Gangamopteris* from the Permian deposits of the Southern Primorie. *Paleontological journal*. 1967; (2): 113–121. (In Russ.)]
20. Зимина В.Г. Флора ранней и начала поздней перми Южного Приморья. М., 1977. [Zimina V.G. Flora of Early Permian and beginning of the Late Permian of the Southern Primorie. Moscow, 1977. (In Russ.)]
21. Broutin J., Roger J., Platel J.P. et al. The Permian Pangea. Phytogeographic implications of new paleontological discoveries in Oman (Arabian Peninsula). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris. Ser. IIa*. 1995; 321: 1069–1086.
22. Wang Z.-Q. Past global floristic changes: the Permian great Eurasian floral interchange. *Palaeontology*. 1996; 39(1): 189–217.
23. Schmalhausen J. Beitrage zur Jura-Flora Russlands. St.-Peterbourg, 1879; (Mémoires de l'Académie impériale des sciences de St.-Peterbourg. VII Serie. T.XXVII, №4).
24. Zalessky M.D. Flores permiennes du la plaine Russe, de l'Oural et du bassin de Kousnetzki et les correlations des dépôts qui les contiennent. *Problems of Paleontology*. V.II–III. Moscow, 1937; 9–35.
25. Залесский М.Д. О новых ископаемых растениях антраколитовой системы Кузнецкого бассейна. I. Известия Академии наук. VII серия. Отделение математических и естественных наук. 1933; (8): 1213–1258. [Zalessky M.D. On new fossil plants of the Antracolithic System of the Kuznetsk Basin. I. Reports of the Academy of Sciences. VII Serie. Section of the mathematical and natural sciences. 1933; (8): 1213–1258. (In Russ.)]
26. Нейбург М.Ф. Верхнепалеозойская флора Кузнецкого бассейна. М; Л., 1948. [Neuburg M.F. Upper Paleozoic flora of the Kuznetsk Basin. Moscow; Leningrad, 1948. (In Russ.)]

Age-Long History of One Paleobotanical Idea

S.V.Naugolnykh

Geological Institute, RAS (Moscow, Russia)

The article is devoted to the historical review of finds of the fossil leaves belonging to the genera *Glossopteris* and *Pursongia* in the Upper Permian deposits of Russia. Main issues of systematics of these plants are briefly discussed; the significance of *Glossopteris* and *Pursongia* for paleophyto-geographical reconstructions is summarized as well. The author's opinion on conditions of formation of findspots of the *Pursongia* leaves in the Upper Permian deposits outcropped in the basins of the Malaya Severnaya Dvina (Little Northern Dvina) and Sukhona rivers is given.

Keywords: Permian period, paleobotany, *Glossopteris*, *Pursongia*, Angaraland, Gondwana.

Алюминий везде... Где?

А.М.Портнов

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (Москва, Россия)

Использование аэрогамма-спектрометрии при поисках бокситов на Северном Урале позволило выявить роль калия в андезитах силура при бокситообразовании. Изучение акцессориев в бокситах показало, что главный кластогенный минерал руд — решетчатый титаногематит, возникший при высокотемпературном окислении титаномагнетита. Щелочные андезиты и игнимбриты палящих туч служили благоприятным исходным субстратом для образования переотложенных бокситов в известняках девона. В 2019 г. Россия импортировала недостающие 70% глинозема и бокситов для производства 3.7 млн т первичного алюминия, из которого экспортировано 3.1 млн т в виде слитков.

Ключевые слова: алюминий, коры выветривания, боксит, СУБР, аэрогамма-спектрометрия, аномалии калия и тория, палящие тучи, титаногематит, прогноз.

Алюминий — металл с необычной судьбой. Состав железных метеоритов — свидетельство того, что при формировании Земли алюминий не нашел места в тяжелом железоникелевом ядре нашей планеты. Из мантии его вытеснили силикаты магния — оливин и пироксен. Весь алюминий из грандиозного объема формирующейся планеты накопился в тонкой пленке земной коры. Там его много. Среднее весовое содержание (кларк) алюминия — 7.9%. Сиаль — так называли (по тесно соединенным в структуре минералов кремнию и алюминию) земную кору отцы-основатели геохимии — В.М.Гольдшмидт, В.И.Вернадский, А.Е.Ферсман.

Разделение алюминия и кремния оказалось сложнейшей задачей для химиков XIX в. Когда в 1855 г. на Всемирной Парижской выставке выставили алюминиевый слиток, он казался посетителям редчайшей драгоценностью. Попал он на выставку благодаря сложной технологии французского химика А.Сент-Клер Девиля, которому все же не удалось найти способ получения дешевого алюминия.

Проблема отделения алюминия от кремния

Самые распространенные магматические породы земной коры содержат алюминий в виде алюмосиликатов. Эти минералы представлены натрий-



Александр Михайлович Портнов, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и геохимии Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе. Область научных интересов — минералогия, геохимия, геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Постоянный автор «Природы». e-mail: a.m.portnov@mail.ru

кальциевыми плагиоклазами, калиевыми полевыми шпатами, слюдами, нефелином и др., которые входят в состав магматических пород — андезитов, базальтов, гранитов, сиенитов. Из осадочных пород наиболее богаты глиноземом (Al_2O_3) глинистые сланцы, где алюминия много в глинах и гидрослюдах.

Во всех этих минералах небольшой по размеру катион Al^{3+} занимает позицию Si^{4+} , образуя с ним общую анионную группу. «Маскируясь под кремний», алюминий оказывается прочно «впаянным» в кристаллическую структуру породообразующих минералов. Выделение его в виде металла требует большого количества электроэнергии.

Поэтому один из самых распространенных металлов земной коры был в чистом виде выделен сложными реакциями и значительно позже большинства других металлов. Датский физик Г.Х.Эрстед стал первым человеком, увидевшим в 1825 г.

капельку блестящего металла. Но о промышленном получении алюминия можно было только мечтать.

Первым о металле будущего задумался Н.Г. Чернышевский. В 1863 г. он описал в романе «Что делать?» дворцы социализма, где под коврами блестятели полы из алюминия, который в то время стоил чуть дешевле золота. Чернышевский гениально угадал незаменимый строительный материал эпохи, отдаленной от него на 150 лет. В драгоценном алюминиевом снаряде послал своих героев на Луну писатель-фантаст Жюль Верн.

Уникальная горная порода — боксит

В 1821 г. геолог П.Бертье описал во Франции, около деревни Ле Бо, пласты красной осадочной породы среди известняков и назвал ее бокситом. Бокситы состоят из минералов с разными названиями: гиббсит, бёмит, диаспор. Но состав у них сходный. Все они — гидроксиды алюминия, без кремнезема. Природа сама провела энергозатратную реакцию разделения этих элементов. Бокситы с содержанием оксида алюминия до 60% — лучшая в наше время руда алюминия. Качество бокситов снижают постоянные примеси силикатов (каолинита и гидрослюд), гидроксидов железа, титана и прочих минералов.

Технологи пытались получить металл электролизом из раствора гидроксида алюминия $Al(OH)_3$ или его солей. Но в водных электролитах алюминий мгновенно окислялся. Нужный растворитель нашелся только в 1886 г., когда в Париж практически одновременно пришли две заявки на патенты дешевого получения серебристого металла от молодых людей с разных концов планеты. Один из них, Чарльз Холл, — студент, жил и учился в США. Другой — молодой инженер Поль Эрру — работал во Франции. Оба родились в 1863 г. Независимо друг от друга они занялись одной и той же проблемой и решили ее совершенно одинаково.

Экзотический минерал

Электролитический алюминий был получен с помощью редчайшего минерала криолита — Na_3AlF_6 . В переводе с греческого это название означает «ледяной камень». Действительно, минерал прозрачен и хрупок, как ломкий осенний лед. В мире существовало единственное промышленное месторождение криолита. В соответствии с названием минерала оно находилось за полярным кругом, около гигантских ледников Гренландии.

Со всего света приходили бесчисленные корабли к скалистому мрачному берегу за белоснежным

криолитом из уникальной копи Ивигтут, ныне давно отработанной. Оказалось, что «ледяной камень» легкоплавок и превращается при нагревании в прозрачный электролит. В этом растворе очищенный и прокаленный боксит (глинозем) растворяется, словно сахар в горячем чае. Под действием мощного потока электроэнергии выделяется жидкий алюминий, который собирается на катоде — в железной ванне. Процесс идет непрерывно: чистый металл сливают, а в ванну загружают новые порции глинозема. Герметическая корка застывшего сверху криолита надежно предохраняет металл от окисления. Сейчас миллионы тонн криолита синтезируют на заводах из смеси глинозема, соды и флюорита (CaF_2).

...Судьба определила обоим изобретателям одинаковый срок жизни: Эрру и Холл скончались в 1914 г. Но уже к 1913 г. мировая выплавка алюминия по их методу составила 65 тыс. т, а к началу Второй мировой войны достигла миллиона тонн. Обозначилась и ведущая отрасль промышленности — самолетостроение. Алюминий получил название «крылатый металл», он стал важнейшим стратегическим элементом войны.

Металл войны

Во Второй мировой войне Гитлер имел в своем распоряжении бокситы оккупированных стран — Франции, Югославии, Греции, а также стран-союзников — Венгрии и Румынии. В фашистском блоке за период 1941–1945 гг. было выплавлено около 1.7 млн т алюминия. Воздушный флот Германии состоял из мощных скоростных цельнометаллических машин.

СССР в первые полтора-два года войны попал в катастрофическое положение. Днепровский алюминиевый завод (на базе Днепрогэса) быстро захватили немцы, Тихвинский глиноземный завод (на базе небольшого Тихвинского месторождения бокситов) оказался в зоне боевых действий, Уральский алюминиевый завод (на базе Североуральского рудника) выдал первый металл только 7 января 1943 г. В итоге на наших истребителях в первые годы войны вместо металла использовали дерево, авиафанеру, импортный брезент. Скорость машин из-за этого заметно снижалась... Резкий дефицит алюминия и, соответственно, истребителей привел к тому, что в начале войны немцы были полными хозяевами в воздухе.

И.Сталин 7 октября 1942 г. пишет Ф.Рузвельту: «...Советское Правительство было бы готово пойти на некоторое уменьшение поставок американских предметов вооружения Советскому Союзу...

Но вместе с тем мы крайне нуждаемся в увеличении поставок самолетов-истребителей современного типа (например, «Аэрокобра»). <...> Было бы очень хорошо, если бы США во всяком случае обеспечили нам следующие поставки (ежемесячно): истребители — 500 шт., грузовики — 8 или 10 тыс. шт., алюминий — 5 тыс. т, взрывчатые вещества — 4–5 тыс. т»*. Для успешного ведения грандиозной войны Сталин срочно просил у США «взаймы или в аренду» (ленд-лиз) прежде всего 60 тыс. т алюминия и 6 тыс. «аэрокобр» в год.

Истребители и «крылатый металл» оказались для СССР важнее танков и артиллерии. Борясь с немецкими подводными лодками, теряя корабли и моряков, Британия и США в самые тяжелые годы войны (в том числе и в 1941 г.) поставили по ленд-лизу морскими конвоями 701 и 204 самолета соответственно. Огромная помощь самолетами (больше 18 тыс.) от союзников пришла в самое трудное время, особенно в 1943 г. (рис.1). США, Канада, Британия за четыре года доставили также 301 тыс. т алюминия**, что позволило резко увеличить выпуск и качество советских самолетов и к 1944 г. добиться превосходства в воздухе.

Надо подчеркнуть, что, кроме алюминия, по ленд-лизу СССР получил за годы войны бесценные стратегические товары: практически все олово, необходимое для консервных банок (94%); автомобильные покрышки (92%), молибден (67%), кобальт (57%), 376 тыс. «Студебеккеров», на кото-

* Переписка председателя Совета министров СССР с президентами США и премьер-министрами Великобритании во время Великой отечественной войны 1941–1945 гг. М., 1958.

** Бутенина Н.В. Ленд-лиз — сделка века. М., 2004. С.312.

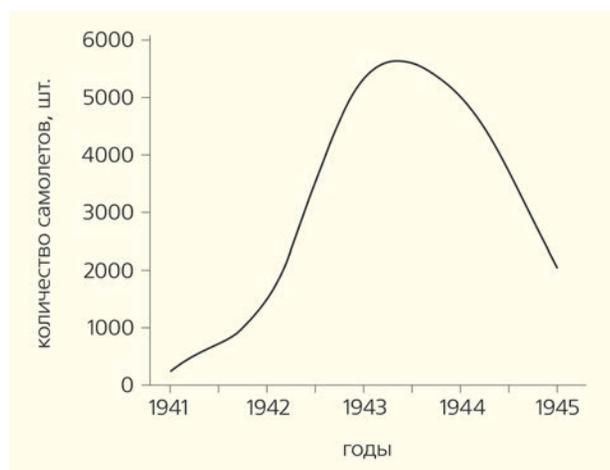


Рис.1. Количество самолетов, переданных США в СССР по ленд-лизу в 1941–1945 гг. [Бутенина Н.В. Ленд-лиз — сделка века. М., 2004.]

рых поставили «Катюши»; 2 млрд банок тушенки, больше половины пороха и взрывчатых веществ, авиационный бензин и т.д. К сожалению, многие об этом сейчас забывают.

СССР за время войны выплавил «крылатого металла» 263 тыс. т. Хотя Советский Союз имел в войну алюминия вдвое меньше, чем получили немцы, этого количества нам хватило. Была проведена грандиозная работа по срочной перевозке с Украины на Урал и в Сибирь огромных алюминиевых заводов. 7 января 1943 г. заработал Каменск-Уральский алюминиевый завод, а позже — Новокузнецкий и Богословский. Заводы нуждались в мощной сырьевой базе. И тогда возникла другая проблема, вскоре ставшая первостепенной, — где найти в больших количествах боксит, единственную горную породу, из которой экономически выгодно получать алюминий.

Бокситы Северного Урала

Начиная с послевоенного времени до 80% всего советского алюминия выплавлялось из бокситовых залежей огромного месторождения, залегающего среди известняков девонского возраста на Северном Урале. Но многие десятки лет выходы охристых сургучно-красных пород, которые называли «Красной Шапочкой», ошибочно считались бедными железными рудами.

Только в 1931 г. геолог Н.А.Каржавин проанализировал их. В образцах оказалось 50% оксида алюминия! Захват немцами бокситовых месторождений в районе Волхова ускорил и без того срочную закладку карьеров и шахт на Урале. Североуральский бокситоносный район (СУБР) стал снабжать весь СССР бокситом. Из него выплавлялся советский алюминий. Но к 70-м годам прошлого века запасы СУБРа стали истощаться. Глубокие шахты заливались водой. Пришлось менять русла рек, чтобы уменьшить водоотлив. Гигантские ГЭС Сибири строили в расчете на обнаружение отечественных бокситов. Перспективы разведчиков, к сожалению, ограничились Средне-Тиманским бокситоносным регионом, а также Казахстаном. Огромной стране бокситы в основном давал СУБР.

Технологи СССР не от хорошей жизни предложили дорогостоящие схемы извлечения металла из порообразующих минералов: нефелина ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) с 33% Al_2O_3 и алунита (сульфата калия и алюминия) с 37% Al_2O_3 . Предлагали также разрабатывать залежи дистена (Al_2SiO_5) с 63% Al_2O_3 на Кольском п-ове.

Поисковые партии двинулись в Среднюю Азию, где в 1915 г., во время Первой мировой войны, без-

успешно искал алюминиевые красноцветные породы Ферсман. Правительство СССР требовало от Министерства геологии прироста запасов.

Когда «заполыхала» холодная война, в период 1960–1970 гг. СССР выплавлял по миллиону тонн алюминия ежегодно, но запасы бокситов убывали. В обстановке дефицита руды нашу аэрогеофизическую группу Всесоюзного института минерального сырья (ВИМС) направили на Северный Урал, чтобы помочь выяснить перспективы СУБРа.

Авторитеты мешают думать

Нам предстояло исследовать аэрогамма-спектрометрической съемкой площадь 4 тыс. км², выделить известные выходы бокситов и найти новые. К тому времени наша группа научилась успешно разыскивать с воздуха месторождения золота, серебра, молибдена, меди, висмута, свинца, цинка [1]. Но искать бокситы?.. Для успешного поиска надо знать, как возникает боксит. Почему 400 млн лет назад в девонском море на белые известняки неожиданно легли массы красных глиноземистых илов, а потом их снова запечатали пласты известняка? За счет чего и как возникли бокситы СУБРа?

Оказалось, что советская геологическая наука долгое время считала бокситы химическим осадком. Академик А.Д.Архангельский — глава осадочников СССР — писал: «Совершенно исключается образование бокситов элювиальным путем в верхних частях коры выветривания. Бокситы — осадочные породы водных бассейнов, возникшие путем выделения минеральных компонентов из растворов, поступающих в бассейны при выветривании алюмосиликатных пород» [2]. Академик А.Л.Яншин считал, что «...бокситы создавались кислыми растворами вулканических фумарол, которые выносили Al³⁺ в море» [3]. Известный осадочник академик Н.М.Страхов тоже считал бокситы сформировавшимся из кислых вулканических растворов [4].

Вторил академиком в дискуссии о происхождении бокситов СУБРа ставший академиком в 1964 г. геолог-тектонист А.В.Пейве: «Привнос латеритного материала с суши на севере Урала был невозможен по палеогеографическим данным, поскольку в бокситах СУБРа отсутствуют терригенные минералы» [5]. Поддержал академиком геолог К.К.Зеленов, подсчитав, сколько тысяч тонн алюминия попадает в океан с кислыми водами, текущими с курильских вулканов [6]. Согласно его модели, бокситы отлагались вдоль вулканических дуг, независимо от палеоклимата.

Впоследствии Пейве пришел к выводу, что бокситы образуются вулканогенно-осадочным путем

в зонах активной подводной деятельности. По этой гипотезе, бокситы залегают вблизи подводных вулканов. Надо заметить, что наша геологическая наука, занятая практическими задачами (поиском месторождений и составлением геологических карт на огромной и малоизученной территории СССР), была невнимательна к зарубежным научным идеям. Железный занавес носил не только политический характер. Доносы, аресты видных ученых, секретность и призывы к поиску врагов народа стали бедствием и для геологов. Учебники сообщали о запасах полезных ископаемых в целом мире — но «без СССР и стран народной демократии», словно эти государства исчезли с глобуса... Многие металлы и месторождения Советского Союза запрещалось упоминать в научных статьях, безумием было и строгое засекречивание довольно скверных топографических карт.

Такая «забота» государства отражалась на психологии ученых и производственников, нагнетала обстановку неуверенности и страха, порождала нелепые геологические модели. Враждебно воспринималась «западная» теория А.Вегенера о дрейфе континентов, совершенно секретными (доступными только для атомных подводных лодок) оставались океанографические исследования. Не оценили советские ученые и открытие колоссальных залежей бокситов в корах выветривания глинистых сланцев Экваториальной Африки, сиенитов о.Лос в Гвинее, базальтов Индии...

Старая, еще дореволюционная геологическая школа, знакомая с работами зарубежных геологов, указывала, что вести поиски бокситов надо в тех районах, где когда-то был жаркий влажный климат и активно шли процессы химического выветривания глиноземистых пород — базальтов и сланцев. В таких условиях двухвалентное железо в минералах окислялось и превращалось в красно-бурый гидроксид железа. Из алюмосиликатов выносились калий, натрий, кальций, а вместе с ними из выветрелой породы под воздействием щелочной воды растворялся и уходил кремний. В элювии (древней коре выветривания) оставались только инертные малоподвижные гидроксиды алюминия и железа.

Сейчас жаркий влажный климат на Земле характерен для экваториальных широт. Но в прошлом и климат был теплее, и континенты дрейфовали по океанам, подставляя солнцу рыжие склоны гор. Здесь «вызревали» бокситы. Позже реки переносили их в море. Такое мнение упорно отстаивал, например, сотрудник Геологического комитета России, а впоследствии и РСФСР, С.Ф.Малявкин [7].

После Второй мировой войны многие западные геологи работали в жарких странах: в Австралии,



Рис.2. Обломочная текстура боксита. Натуральная величина. Северный Урал.

Здесь и далее фото автора

Бразилии, Индии, в государствах Африки. Там они наблюдали удивительную картину: во влажном тропическом климате базальты, глинистые сланцы, сиениты буквально «гнили», превращаясь в железисто-глиноземистую труху. Их жгло солнце, поливали дожди, и возникали мощные красноцветные «кирпичные» коры выветривания — латериты (от латинского later — кирпич).

Из латеритов выносилось все, кроме алюминия и железа. Железо окислялось и выпадало из темных минералов в виде гидроксидов железа — лимонита, который окрашивал глиноземистые коры выветривания в красный (как на Марсе) цвет. Коры выветривания уплотнялись, в них появлялись обломочные, а потом и оолитовые текстуры (рис.2, 3). Именно в жарких странах среди геологов рождалось понимание глобального латеритного процесса выветривания поверхности Земли.

На Северном Урале, на окраине Русской платформы, в силурийский период вулканы изливали пласты лав основных эффузивов. В теплом влажном климате карбона они подвергались латеритному выветриванию. Реки размывали латериты, очищали их от песка и глины, несли красно-бурую мусть в море, на прибрежные отложения известняков. Так накапливались переотложенные высококачественные бокситы. Такой виделась мне модель происхождения бокситов СУБРа.

Бокситы СУБРа — коры выветривания андезитов

Погода на Урале стояла хорошая. За две недели самолет «Ан-2» закрыл геофизической съемкой ра-

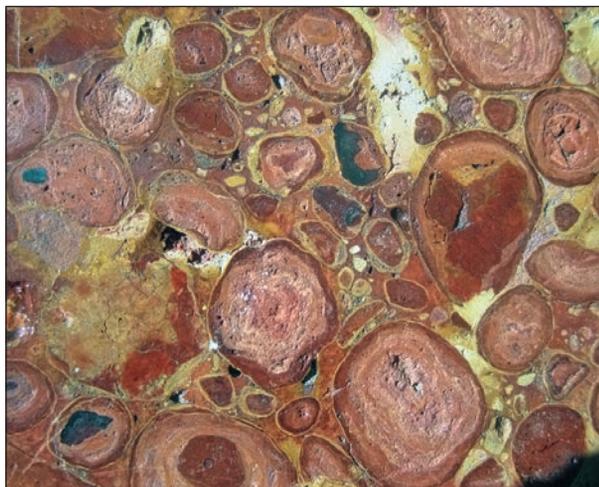


Рис.3. Оолитовая текстура боксита. Черные зерна — магнетит, замещенный титаногематитом. Натуральная величина. Северный Урал.

бочую площадь. Еще через неделю результаты съемки появились на геологической карте. Выходы бокситов обозначились полосами ториевых аномалий. Западнее мощной меридиональной полосой шли эффузивы сосвинской свиты силура, обозначенные на геологической карте как базальты. Наша наземная проверка показала, что это были гораздо более кислые породы — андезитовые туфы, щелочные игнимбриты с высоким содержанием калия (4–5% K_2O) и натрия (2–3% Na_2O) (рис.4).

Андезиты из-за обилия газов называют взрывчатыми лавами, которые часто создают грозные палящие тучи вулканов. Особенно много калия и натрия присутствовало в андезитах к западу от «Красной Шапочки». Мы решили, что щелочность исходных пород способствовала образованию бокситовой руды. Чтобы доказать связь андезитов и бокситов, я решил поискать обломочные кластические минералы, оставшиеся в бокситах после выветривания андезитов.

Академик Пейве в бокситах СУБРа вообще не обнаружил кластических минералов. Но в монографии С.И.Бенеславского указывался главный обломочный минерал СУБРа — титаномagnetит [8]. Он характерен для габбро — глубинных основных пород, бедных щелочами. На Северном Урале габбро нет. Тогда откуда взялся боксит?

При промывке раздробленных бокситов в шлихах я нашел циркон, апатит, космические магнитные шарики. Преобладали же магнитные черные кубические и октаэдрические кристаллы и зерна. Именно этот минерал Бенеславский считал титаномagnetитом.

Титаномагнетит представляет собой распавшуюся при охлаждении до 600°C титановую шпинель, или ульвёшпинель, — минерал основных магм, который устойчив лишь при высокой температуре. Охлаждаясь, он распадается на магнетит $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{O}_4$ и ильменит FeTiO_3 , образуя характерную решетку распада твердого раствора. Титаномагнетит со структурами распада типичен не для вулканических лав, а для глубинных основных пород. На СУБРе их нет. Тогда откуда взялся титаномагнетит? Хорошо сохранившиеся в бокситах кристаллы указывали, что это был минерал близкого сноса.

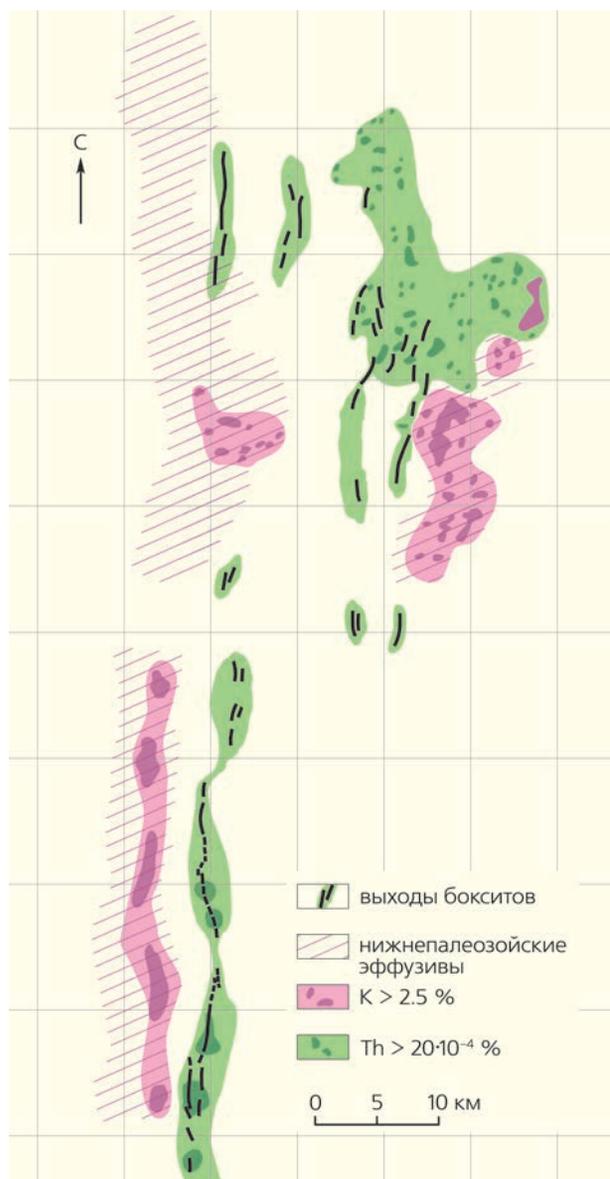


Рис.4. Переотложенные в известняках девонского моря коры выветривания калиевых ($K > 2.5\%$) андезитов силура превратились в бокситы ($Th > 20 \cdot 10^{-4}\%$). Аэрогамма-спектрометрическая съемка.

Титаногематит — минерал палящих туч

При камеральной обработке в Москве выяснилось, что решетчатые срастания представлены не ильменитом — продуктом глубинного распада ульвёшпинели, а гематитом Fe_2O_3 , похожим на магнетит. В минералогическом справочнике П.Рамдора [9] я отыскал похожую решетку! Это была решетка высокотемпературного окисления магнетита с образованием гематита замещения, который геологи называют мартитом (рис.5). Рамдор нашел его в черных от магнетита песках на берегах о.Калимантан в центре Малайского архипелага. «Мартит прокаливания» остался от размытых морем вулканических туфов, сформировавшихся при 800°C из палящих туч, которыми печально известна Индонезия.

Гематит (мартит) СУБРа тоже возник в палящих тучах за счет окисления магнетита. Академик Н.В.Белов отмечал, что при замещении магнетита гематитом кислород не проникает внутрь кристаллов вследствие большого размера ионов O^{2-} . При окислении используется дырочный механизм для передвижения избыточных окисленных катионов Fe^{3+} по основному каркасу из плотно упакованных кислородных анионов до поверхности кристалла.

Реликтовый магнетит оставался среди гематитовой решетки (рис.6). Иногда магнетит полностью замещался бокситом, тогда от кристаллов сохранялись лишь «призраки» с контуром октаэдра, обозначенным пластинками гематита (рис.7).

Микрозондовые анализы показали удивительную картину поведения титана: при окислении титаномагнетита весь рассеянный TiO_2 собирался в новообразованном гематите! Здесь его накопилось 20%, тогда как в магнетите осталось всего 1–2%.



Рис.5. Проращение магнетита «мартитом прокаливания» (светлое) из туфов палящих туч вулканов с о.Калимантан. Аншлиф, отраженный свет. Серое — реликтовый магнетит. Увеличение 240 [9].

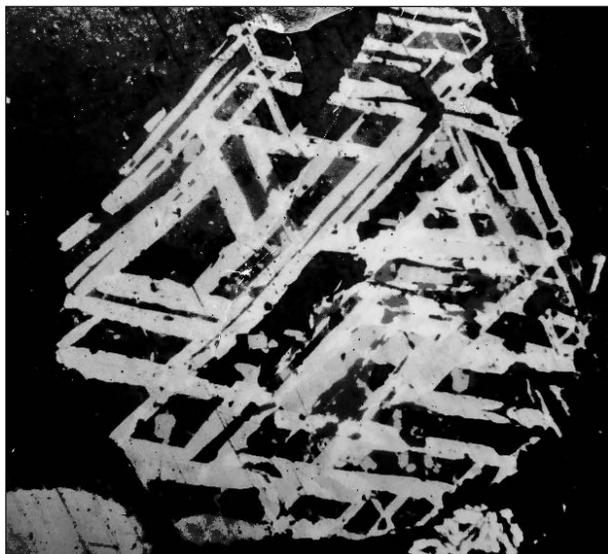


Рис.6. Решетчатая микроструктура, образованная при высоко-температурном замещении магнетита (серое, 2% TiO_2) пластинчатым титаногематитом (светлое, 20% TiO_2) в боксите (черное). Северный Урал. Аншлиф, отраженный свет. Увеличение 160.

Это был титаногематит, отличавшийся от гематита пониженной отражательной способностью, более сильным двуотражением и увеличенными, по сравнению с гематитом, параметрами элементарной ячейки: $a_0 = 5.047 \text{ \AA}$ и $c_0 = 13.075 \text{ \AA}$, что свидетельствовало о вхождении титана в решетку гематита [10, 11].

Я провел эксперименты, прокаливая в окислительной среде титаномagnetиты из месторождения Африканды (Кольский п-ов), содержащие 9% равномерно рассеянного титана. Оказалось, что в титаномagnetите титан при 1000°C и окислении железа быстро двигался и накапливался в гематите! В титановом магнетите возникал пластинчатый гематит с 23% TiO_2 (титаногематит), а в магнетите титана оставалось не больше 3% (рис.8).

Значит, окисление титаномagnetита происходило в андезитовых палящих тучах с образованием титаногематита. Калиевые игнимбриты в вулканах силура оказались наиболее благоприятными породами для бокситообразования. Мы выделили перспективные площади, обращая внимание на положение аномалий калия и тория. Впоследствии прогноз подтвердился, щелочные эффузивы с калием пространственно коррелировали с бокситами (см. рис.4), что позволило провести разведку на севере исследованной площади.

В Москве мы защищали отчет о перспективах СУБРа. Оппонентом назначили профессора Г.И.Бушинского из Геологического института (ГИН АН СССР) — главного куратора страны по бокситам.

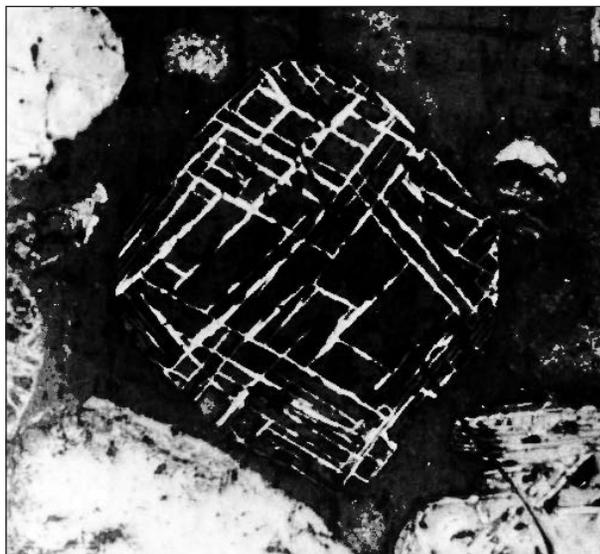


Рис.7. «Тень» октаэдра магнетита, обозначенная скелетом из пластинок титаногематита (светлое) в боксите (черное), заместившем магнетит. Северный Урал. Аншлиф, отраженный свет. Увеличение 160.

Бушинский прочитал отчет и вызвал меня в ГИН. Видно было, что он потрясен. Профессор напоминал К.С.Станиславского с его знаменитым «Не верю!». Его можно понять: все предыдущие годы геологи, в том числе сотрудники ГИНа, принимали главный бокситовый аксессуар, возникший в палящих тучах, за глубинный минерал [8, 12]. Соот-



Рис.8. Пластины гематита с 23% TiO_2 (белое), образовавшиеся в титаномagnetите с равномерным распределением титана (черное) при его прокаливании в окислительной среде при 1000°C в течение 1 ч. Месторождение Африканда (Кольский п-ов). Аналогично возник и титаногематит СУБРа. Аншлиф, отраженный свет. Увеличение 300.

ветственно, вдали от бокситовых залежей искали несуществующие габброиды, за счет которых якобы образовались руды СУБРа.

Георгий Иванович пошел со мной в литотеку ГИНа и выложил образцы, где черные кристаллы создавали сплошные прослои в бокситах: «Пока не проанализируете эталонный титаномагнетит — не поверю!». Микрозонд показал, что это были октаэдры магнетита, замещенные титаногематитом с 18–20% TiO_2 (титановым мартитом). Значит, именно переотложенные каменноугольные коры выветривания щелочных туфоандезитов силура создали бокситы СУБРа. За отчет мы получили отличную оценку.

Металл технической цивилизации

С тех пор прошло много лет. Но алюминий остается важнейшим металлом нашей цивилизации. Он практически не встречается в природе в самородном состоянии. Изредка в базальтах попадались блестящие металлы, да еще в некоторых алмазах под микроскопом видели микрочешуйки алюминия. Это означает, что в породах и минералах иногда возникала аномальная, резко восстановительная среда.

Современная цивилизация нарушила законы земной коры. На планете в огромном количестве появился чистый металл, который миллиарды лет не встречался в природе. Даже если наша цивилизация погибнет, масса металлического алюминия, используемого в строительстве, судах, автомобилях, авиации, электротехнике и т.д., останется для инопланетян индикатором некогда достигнутого технического уровня на Земле.

В 2019 г. в мире было выплавлено первичного алюминия (из бокситов) более 60 млн т. Из них 33 млн т получил Китай из собственных бокситов, а также австралийских и африканских. Мощная энергетическая база Китая — 3,8 млрд т угля (почти половина добываемого угля Земли) и гигантские ГЭС на р.Янцзы — позволяет выплавлять более половины алюминия планеты. Почти весь металл Китай использует внутри страны, что свидетельствует об исключительно высоком развитии промышленного производства. Вторичным алюминиевым переделом (около 6 млн т) Китай снабжает весь мир. Главный потребитель — США, исповедующие принцип «Держи Америку в чистоте» и поэтому избегающие развивать у себя экологически вредное производство алюминия. США предпочитают закупать алюминий за рубежом.

Россия со значительным отставанием занимает второе место, получив в 2019 г. 3,7 млн т первич-

ного алюминия. По вывозу необработанного металла Россия также занимает второе место в мире: в 2019 г. экспорт составил 3,1 млн т, что представляет собой «большой успех», поскольку ранее в течение многих лет экспорт Al в слитках из России достигал 97% выплавки. Удивительно, что металл, который СССР в 1942 г. срочно получал по ленд-лизу, в современной России не находит применения для вторичного передела!

Примерно треть всего алюминия РФ выплавляет из своих бокситов, остальной металл — за счет вывоза глинозема с Украины (до 40% импорта), из Казахстана (20%), Австралии (20%), а также из Бразилии, с Ямайки, из Ирландии и Гвинеи. Кроме того, компания РУСАЛ, владеющая всем алюминием РФ (хозяин — Олег Дерипаска, совместно с американцами), разрабатывает два месторождения в Гвинее. За алюминий в слитках хозяева металла получают около 5 млрд долл. ежегодно.

Многие страны используют дешевый вторичный алюминий: Япония, Германия, Италия, Франция выплавляют 0,6–1,0 млн т, а Китай и США — до 3–4 млн т вторичного алюминия ежегодно. Россия до сих пор не решила важнейшую проблему сбора и обработки вторичного сырья как руды нового типа. Вторичный алюминий составляет в РФ не более 10% от первичного, хотя его себестоимость значительно ниже выплавленного из бокситов.

Колебания цен на металл заметно зависят от главных игроков на мировом рынке: Китая (мировой поставщик алюминиевых изделий, экспорт около 6 млн т в 2019 г.; кроме того, 0,5 млн т — в слитках) и США (импорт в 2016–2017 гг., в том числе из РФ (рис.9), составлял 5–6 млн т ежегод-

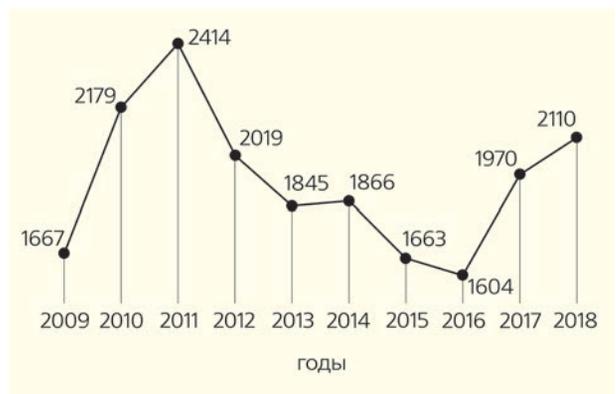


Рис.9. Динамика среднегодовых цен (долл./т) на высокосортный алюминий (99,7% Al) в 2009–2018 гг. на Лондонской бирже металлов [ВИМС. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 г. М., 2019].

но). Укрепление доллара и ослабление юаня в 2014–2016 гг. отразились на стоимости многих металлов, в том числе и алюминия*. Россия снабжает «металлом современной цивилизации» За-

падную Европу (через Нидерланды), США, Японию, Турцию. Она использует для этого дешевое электричество, которое много лет дают гидроэлектростанции еще советской постройки, созданные для выплавки алюминия за счет энергии могучих рек Сибири. Крупнейший в мире Братский алюминиевый завод производит ежегодно более миллиона тонн металла. ■

* ВИМС. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 г. М., 2019.

Литература / References

1. *Портнов А.М.* Радиогеохимическая специализация калия и тория и ее связь с оруденением. Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1987; 3: 101–121. [*Portnov A.M.* The radio geochemical specialization of potassium and thorium and its relationship with mineralization. Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. Geol. 1987; 3: 101–121. (In Russ.).]
2. *Архангельский А.Д.* Типы бокситов СССР и их генезис. Тр. конф. «Генезис руд железа, марганца и алюминия». М., 1937. [*Arkhangelsky A.D.* Types of bauxites of the USSR and their genesis. Tr. conf. «Genesis of iron, manganese and aluminum ores». Moscow, 1937. (In Russ.).]
3. *Яншин А.А.* Вулканизм и осадочное рудообразование. Бюлл. МОИП, нов. сер., отд. геол. 1968; 43(4). [*Yanshin A.A.* Volcanism and sedimentary ore formation. Bull. MOIP, new. Ser., Dep. geol. 1968; 43(4). (In Russ.).]
4. *Страхов Н.М.* Платформенные бокситы СССР. М., 1971. [*Strakhov N.M.* Platform bauxites of the USSR. Moscow, 1971. (In Russ.).]
5. *Пейве А.В.* Тектоника Североуральского бокситового пояса. Бюлл. МОИП. 1947; 8(4). [*Peive A.V.* Tectonics of the North Ural bauxite belt. Bull. MOIP. 1947; 8(4). (In Russ.).]
6. *Зеленов К.К.* О возможном вулканогенном источнике вещества геосинклинальных бокситов. Les actes du Symposium sur les bauxitesets, et hydroxides d`aluminum. Т.1. Zagreb, 1964. [*Zelenov K.K.* About a possible volcanogenic source of geosynclinal bauxite. Les actes du Symposium sur les bauxitesets, et hydroxides d`aluminum. Т.1. Zagreb, 1964.]
7. *Малявкин С.Ф.* Минералогия и условия образования железоалюминиевых руд. Тр. конф. «Генезис руд железа, марганца, алюминия». М., 1937. [*Malyavkin S.F.* Mineralogy and conditions for the formation of iron-aluminum ores. Tr. conf. "Genesis of iron, manganese, aluminum ores". Moscow, 1937. (In Russ.).]
8. *Бенеславский С.И.* Минералогия бокситов. М., 1974. [*Beneslavsky S.I.* Mineralogy of bauxite. Moscow, 1974. (In Russ.).]
9. *Рамдор П.* Рудные минералы и их сростания. М., 1962. [*Ramdohr P.* Ore minerals and their intergrowths. Moscow, 1962. (In Russ.).]
10. *Портнов А.М., Дубакина Л.С.* Титаногематит из бокситов Северного Урала. Геол. рудн. местор. 1975; XVII(6): 104–107. [*Portnov A.M., Dubakina L.S.* Titanogematite from bauxite of the Northern Urals. Geol. ore deposit 1975; XVII (6): 104–107. (In Russ.).]
11. *Портнов А.М., Дубакина Л.С.* Диффузия титана в магнетите и генезис титаногематита. ДАН СССР. 1979; 245(1): 215–218. [*Portnov A.M., Dubakina L.S.* Diffusion of titanium in magnetite and the genesis of titanogematite. DAN USSR. 1979; 245(1): 215–218. (In Russ.).]
12. *Бушинский Г.И.* Геология бокситов. М., 1971. [*Bushinsky G.I.* The geology of bauxite. Moscow, 1971. (In Russ.).]

Aluminum is Everywhere... Where?

A.M.Portnov

Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (Moscow, Russia)

The use of aerogamma spectrometry for the search for bauxite in the Northern Urals has revealed the role of potassium in siluric andesites during bauxite formation. A study of accessories in bauxite showed that the main clastogenic mineral of ores is lattice titanogematite, which has originated during the high-temperature oxidation of titanomagnetite. Alkaline andesites and ignimbrites of scorching clouds served as a favorable initial substrate for the formation of redeposited bauxites in Devonian limestones. In 2019, Russia imported the required 70% of alumina and bauxite to produce 3.7 million tons of primary aluminum, of which 3.1 million tons were exported as ingots.

Keywords: aluminum, weathering crust, bauxite, SUBR, aerogamma spectrometry, anomalies of potassium and thorium, scorching clouds, titanogematite, forecast.

Генетика в московском дворе: насекомые разносят споры гриба, который меняет пол растения

член-корреспондент РАН И.А.Захаров

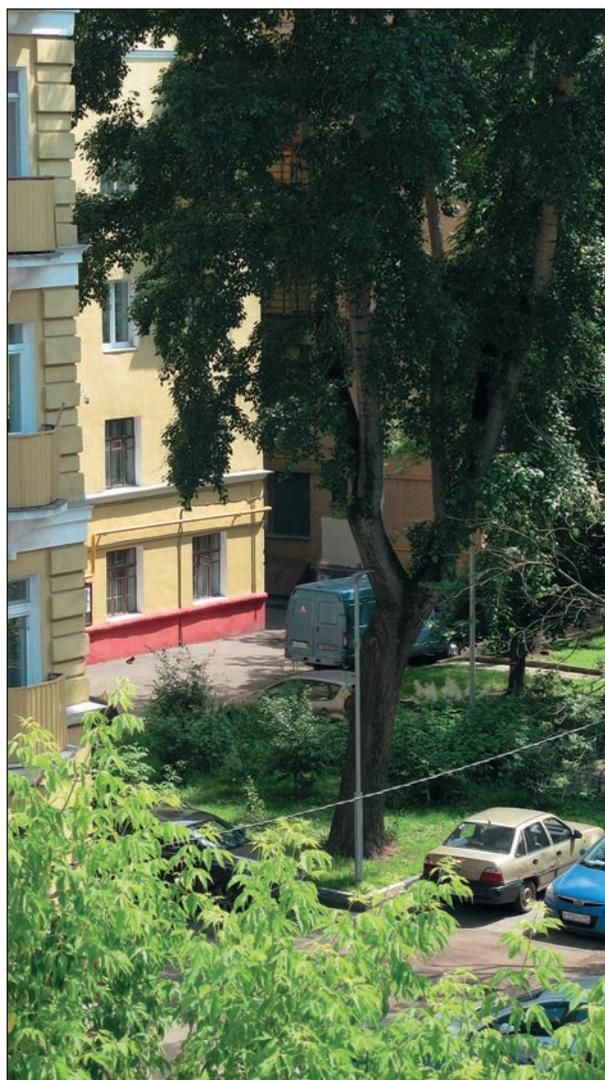
Институт общей генетики имени Н.И.Вавилова РАН (Москва, Россия)

e-mail: iaz34@mail.ru

У меня под окнами во дворе (живу я в Москве, между Садовым и Третьим транспортным кольцами) неухоженная клумба с пионами и колокольчиками. Среди сорняков я заметил несколько цветущих растений дрёмы белой (*Silene latifolia*, или *S.alba*) семейства гвоздичных (Caryophyllaceae). Это травянистое растение — двудомное; на клумбе были и мужские, и женские экземпляры. Когда я обратил внимание на эту колонию дрёмы, женские растения почти все уже отцвели — на них были созревающие коробочки с семенами, а мужские несли много белых достаточно крупных цветков. Я хотел сфотографировать растения и дальше наблюдать за ними, но на следующее утро, когда я спустился во двор с фотоаппаратом, некоторые растения были поломаны вениками, которые бросили на клумбу дворники.

Дрёму генетики уже давно изучили: у этого растения пол, как у людей, определяется хромосомами. Женские растения имеют две X-хромосомы, мужские — X и Y. Есть, однако, одно различие с животными: у человека и других млекопитающих Y-хромосома маленькая, много меньше X-хромосомы, а у дрёмы — наоборот, Y-хромосома по размеру больше X-хромосомы. Мужские цветки с желто-зеленоватыми тычинками, в глубине женских цветков — бочонковидная завязь с рыльцами.

Среди растущих во дворе мужских растений одно выделялось: пыльники у него были черно-фиолетовые. А лепестки, казалось, обсыпаны фиолетовой «пудрой». Это растение было заражено паразитическим грибом *Microbotryum violaceum*. Биологические и генетические особенности этого гриба очень интересны. В пыльниках зараженного растения образуется не пыльца, а споры гриба. Насеко-



Московский двор, где растёт дрёма.

Здесь и далее фото автора



Здоровые растения дрёмы белой: женское (слева) и мужское.

мые, посещающие цветки дрёмы, переносят споры на другие цветки, где споры прорастают, а гифы гриба пронизывают растение и зимуют в его корневище. На следующий год развивается инфицированное растение, которое, когда появляются цветки, производит не пыльцу, а грибные споры.

Так происходит, если заражено мужское растение. Однако гораздо чаще гриб *Microbotryum* поражает женские растения. Споры, напомним, образуются в пыльниках, но их в нормальных женских цветках нет. А вот в зараженных — они есть! Гриб перепрограммирует развитие цветка, делает его гермафродитным — в цветке женского по хромосомам растения развивается и завязь, и тычинки. В пыльниках этих тычинок, однако, пыльца не образуется, а производятся готовые к распространению споры гриба. В своем дворе я нашел и женское зараженное растение.

Немного скажу о генетике гриба *Microbotryum*. У него тоже есть «половые» хромосомы. При прорастании спор на рыльце растения или на искусственной среде происходит мейоз, а среди образующихся в результате мейоза четырех гаплоидных клеток две имеют тип спаривания $a1$, две другие — $a2$. У этого гриба, как и у других грибов, настоящих половых различий нет. Однако при оплодотворении попарное объединение клеток в любых комбинациях невозможно, слиянием управляют соответствующие генетические факторы в половых хромосомах, которые определяют не пол, а так называемый тип спаривания клеток. У того гриба, о котором здесь идет речь, два типа спаривания (у других грибов их может быть больше), и соединение



возможно только клеток разного типа, т.е. в комбинации $a1 \times a2$.

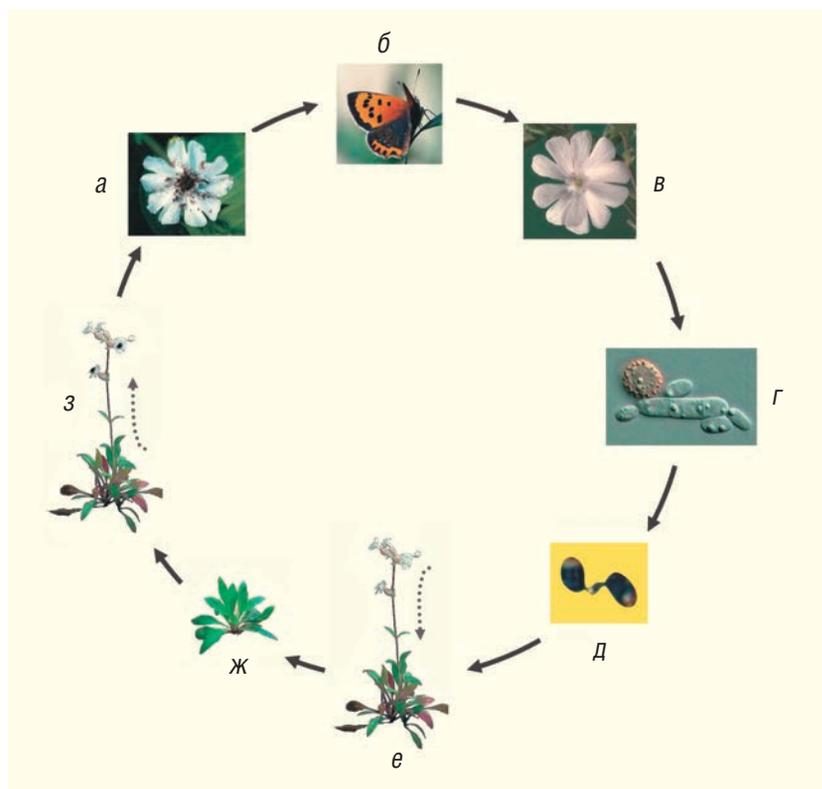
При прорастании спор, повторю, происходит мейотическое деление, в результате из диплоидной споры образуется четыре гаплоидных клетки, которые попарно объединяются. Появившаяся двуядерная клетка (ядра в ней не сливаются) дает начало мицелию, гифы которого прорастают в ткани растения-хозяина.



Гермафродитный цветок зараженного женского растения.



Мужское (слева) и женское растения дрёмы, зараженные грибом *Microbotryum*.



Жизненный цикл гриба *Microbotryum* (DOI:10.1371/journal.ppat.0030176.g001): а — споры гриба на цветке зараженного растения; б — насекомое-опылитель, переносящее споры гриба; в — цветок, на который попали споры гриба; г — клетки, образовавшиеся в результате мейотического деления; д — соединение двух клеток разного типа спаривания; е — прорастание гифов гриба в растении (от цветка до корневища); ж — развитие растения из перезимовавшего корневища; з — прорастание гифов гриба в растении (от корневища до цветков). Публикуется с любезного разрешения автора статьи [1] Т.Жиро (T.Giraud).

Попарное объединение клеток, образовавшихся в результате одного мейотического деления, было названо внутритетрадным спариванием (тетрада — это четыре клетки, образовавшиеся в результате мейоза). Такой тип полового процесса с точки зрения его генетических последствий может быть отнесен к системам близкородственных скрещиваний, таким как спаривание брат/сестра (инбридинг) у животных или самооплодотворение (инцухт, самоопыление) у растений. Генетические последствия близкородственных скрещиваний обычно неблагоприятны, они ведут к гомозиготизации, т.е. к утрате генетического разнообразия и к проявлению тех или иных генетических дефектов.

Что касается нашего гриба, то генетический анализ выделенных из природы его образцов показал, что, несмотря на происходящее в каждом поколении близкородственное скрещивание в форме внутритетрадного спаривания, полной гомозиготности (генетической однородности) в потомстве не достигается, значительная часть генома каж-

дого потомка сохраняет гетерозиготное состояние (имеется в виду сохранение различий между хромосомами двух родительских клеток).

А теперь расскажу о своем романе с дрёмой и микроботриумом, который начался более 55 лет назад. В начале 1960-х годов я, тогда молодой сотрудник кафедры генетики Ленинградского университета, задумался над тем, какие генетические последствия будет иметь слияние клеток одной тетрады. Такое внутритетрадное спаривание, как я его назвал, изредка происходит при размножении дрожжей, винных, пивных и хлебопекарных. В то время я и аспиранты лаборатории работали с дрожжами. Произведя простые расчеты, я показал, что по своим генетическим последствиям внутритетрадное спаривание отличается от других, ранее изученных генетиками систем близкородственного скрещивания. Оно занимает место между самооплодотворением и спариванием брат/сестра, что было неочевидно: при скрещивании брат/сестра объединяются половые клетки, произведенные разными, но родственными организмами, при самооплодотворении объединяются клетки, происходящие от одного организма, но от разных мейозов. В случае же внутритетрадного спаривания соединяются гаплоидные клетки, произошедшие от одной диплоидной, и это, казалось бы, еще более близкое родство, чем в случае самооплодотворения. Получив такой неожиданный результат, я написал статью, но отложил ее в ящик стола — продолжалось еще время лысенковщины и «формально-генетическая» работа имела мало шансов быть опубликованной.

В октябре 1964 г. тридцатилетняя эпоха лысенковщины закончилась, и я сразу отнес статью в «Вестник ЛГУ». На следующий год она была опубликована, а спустя еще пару лет я дополнил и переработал статью, которая вышла в новом тогда журнале «Генетика» [2].

Прошло 30 лет. Я уже работал в Москве, мои научные интересы изменились, за литературой по генетике грибов я перестал следить. Неожиданно в 2004 г. я получил приглашение принять участие в конференции «*Microbotryum/Silene*» в США. Я не знал, что это за организмы, и был в недоумении, почему мне пришло приглашение. Однако, посмотрев

соответствующие справочники, я обнаружил, что эти организмы мне хорошо знакомы, просто раньше их называли по-другому: растение было *Melandrium album*, гриб — *Ustilago violacea*. На раздельнополом *Melandrium* я на летней практике в Старом Петергофе в 1958–1963 гг. демонстрировал студентам расщепление по полу у растений, а на литературу по *Ustilago violacea* ссылался в своих обзорных публикациях. Оказалось также, что организатор конференции Янис Антонович (Janis Antonovics) — профессор в Университете штата Виргиния (University of Virginia), специалист по эволюции и эпидемиологии инфекционных заболеваний в природных популяциях — знает и цитирует мои старые работы с конца 1990-х годов. Позвольте быть нескромным. Я полагаю, что никакая другая статья, опубликованная на русском языке в журнале «Генетика» в 60-х годах, за рубежом через 30 лет не цитировалась. Простите, если я ошибаюсь.

Антонович и его сотрудники изучали популяционную биологию *Silene* и взаимодействие растения-хозяина и гриба-паразита *Microbotryum*. Американские ученые смогли объяснить обнаруженные ими генетические особенности этого гриба, опираясь именно на те теоретические выкладки, которые я сделал еще в 1960-х годах.

Я поехал в США, в Вирджинию, на конференцию, организованную Антоновичем. Одна участница, из Чехии, сказала, что меня признали через



Татьяна Жиро, сотрудник Южного парижского университета, у экспериментальных посевов дрёмы.



Кукушкин цвет — растение, зараженное грибом *Microbotryum*, на поляне в парке Старого Петергофа и в руках автора статьи.

35 лет, как Менделя, однако он, в отличие от меня, до этого не дожил.

Изучение генетики гриба *Microbotryum* сейчас продолжается в США и во Франции. В Южном парижском университете (Université Paris-Sud) прекрасные работы выполняет француженка с русским именем Татьяна Жиро (Tatiana Giraud). В частности, исследователи прочитали весь геном этого гриба и сравнили хромосомы у представителей рода *Microbotryum*, выделенных из разных видов растений.

Грибы, которые раньше описывались как *Ustilago violacea* или *Microbotryum violaceum*, сейчас на основании геномных исследований разделены на несколько видов. Разные виды гриба заражают разные виды растений из семейства гвоздичных. У видов с цветками, в которых развиваются и женские, и мужские органы, превращение половых признаков не происходит, но всегда имеет место поражение пыльников, в которых образуются споры гриба.

В России я и мой студент А.Карапетян обнаружили зараженные экземпляры среди таких видов

гвоздичных, как кукушкин цвет (*Coronaria flos-cuculi*), гвоздика пышная (*Dianthus superbus*), мыльнянка лекарственная (*Saponaria officinalis*), звездчатка ланцетовидная (*Stellaria holostea*), а при просмотре гербария Московского университета следы заражения (черные пыльники) были найдены еще у девяти видов гвоздичных растений. В Старом Петергофе, в парке Сергиевка, на одной поляне среди множества особей кукушкина цвета зараженными оказались до 78% растений.

Именно в Старом Петергофе я работал в конце 1950-х — начале 1960-х годов и там заинтересовался внутритетрадным спариванием и его генетико-эволюционными последствиями [3]. Объект для его изучения был у меня под боком, мимо этой поляны я проходил чуть ли не каждый день летом в течение нескольких лет. Теперь очень жалею, что не обратил внимания на прекрасный объект для экспериментального изучения того явления, которое я впервые проанализировал теоретически. «Если бы юность знала, если бы старость могла». И так всегда. ■

Литература / References

1. Lypez-Villavicencio M., Jonot O., Coantic A., Hood M.E., Enjalbert J., Giraud T. Multiple infections by the anther smut pathogen are frequent and involve related strains. PLoS Pathogens. 2007; 3(11): e176. DOI:10.1371/journal.ppat.0030176.
2. Захаров И.А. Гомозиготизация при внутритетрадном и внутриаоктадном оплодотворении у грибов. Генетика. 1968; 4(1): 98–105. [Zakharov I.A. Homozygosity in intratetrad and intraoctad fertilization in fungi. 1968; 4(1): 98–105. (In Russ.)].
3. Захаров И.А. Внутритетрадное спаривание и его генетико-эволюционные последствия. Генетика. 2005; 41(4): 508–519. [Zakharov I.A. Intratetrad mating and its genetic and evolutionary consequences. Russian Journal of Genetics. 2005; 41(4): 402–411. DOI:10.1007/s11177-005-0103-z.].

Одюбон из Находки: жизнь Игоря Любимова

П.В.Квартальнов

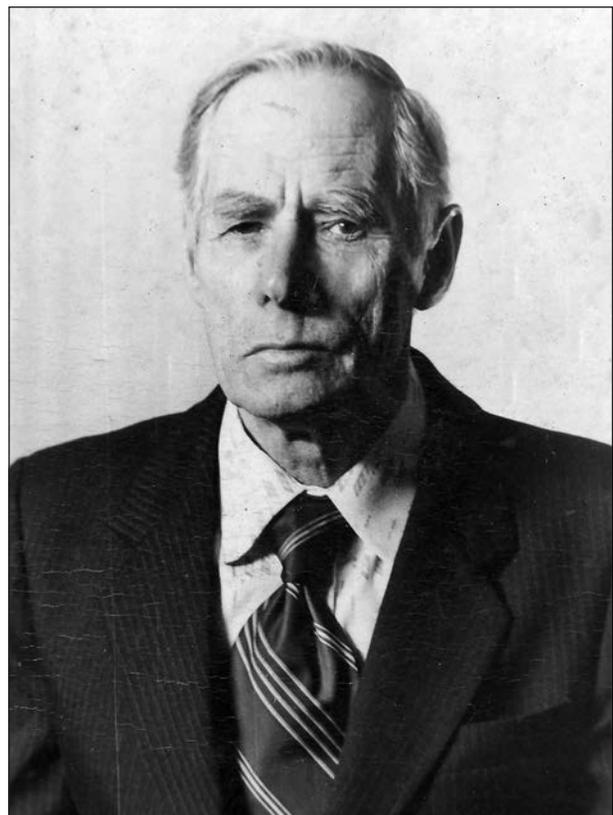
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
e-mail: cettia@yandex.ru

Игорь Дмитриевич Любимов (1911–1990) — специалист в области рыбной промышленности, работавший на берегах Японского моря. Талантливый художник-самоучка, Любимов создал коллекцию рисунков рыб и других животных — обитателей дальневосточных морей. Многоцветные работы, запечатлевшие животных в натуральную величину, не были опубликованы при жизни художника и оставались практически неизвестными до последнего времени, пока серия работ Любимова не была случайно найдена на биологическом факультете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Ключевые слова: Игорь Любимов, натуралист, художник, Находка, рыбы.

Летом 1859 г. русские моряки корвета «Америка» открыли ранее неизвестный залив и удобную бухту на берегу Японского моря. В честь судна залив назвали Америкой, а бухту, где судно спаслось от шторма, окрестили Находкой. В 1864 г. на берегах этой бухты появились переселенцы из Николаевска и заложили одно из поселений. С годами здесь вырос рабочий поселок, а затем и современный город Находка. С этим городом и связал судьбу человек, чьи творческие замыслы вызывают в памяти имя известного американского натуралиста и художника Дж.Дж.Одюбона*. Правда, до последнего времени имя нашего соотечественника, жившего на берегах залива Америка, и его работы были почти никому не известны.

Летом 2017 г. посетителей библиотеки в здании биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (МГУ) встречала выставка акварелей. Сквозь стекла шкафов и витрин, словно из аквариума, на читателей смотрели морские животные. Многоцветные, словно только что вынутые из соленых вод, рыбы, крабы, кальмары соседствовали с морскими звезда-



Любимов в период работы над атласом фауны Японского моря.

ми, морскими ежами и моллюсками. Все они были изображены в натуральную величину. Каждое животное сопровождалось латинским названием, и на многих рисунках можно было рассмотреть сделан-

* Джон Джеймс Одюбон (1785–1851) — американский натуралист, член Лондонского королевского общества и Линнеевского общества, орнитолог и художник-анималист, автор труда «Птицы Америки» (1827–1838). В его честь названо Национальное Одюбоновское общество, первая природоохранная организация в мире. Ж.Кювье назвал его рисунки памятником орнитологии.



Выставка работ Любимова на биологическом факультете МГУ. 2017 г.

ные карандашом или тушью комментарии с указанием места и времени встречи животного. Выставку сопровождало необычное обращение: «Ищем автора этих рисунков».

Как оказалось, рисунки были найдены случайно в одном из шкафов на факультете. Как и когда они туда попали, кто их выполнил, кто и когда привез их в Москву и почему не отослал обратно автору, уже никто не помнил. Подключившись к поиску художника, я вышел на открытки, опубликованные в 1986

и 1989 гг. московским издательством «Изобразительное искусство». Два выпуска открыток под общим названием «Жизнь моря. Дальний Восток» рассказывали про обитателей Японского моря «по материалам Института биологии моря ДВНЦ АН СССР»*. Некоторые открытки почти в точности повторяли рисунки с выставки на биологическом факультете. В аннотации к открыткам значилось, что их нарисовали художники П.И.Замиховский и И.Д.Любимов. Павел Замиховский — художник,

работающий в основном в стиле абстракции, его жизнь и творчество не связаны с морем. Было ясно, что он лишь работал над открытками, но не рисовал животных с натуры. Значит, автор рисунков — Любимов? Дальнейшее удалось узнать благодаря



Японская мохнатоголовая собачка (*Chirolophis japonicus*).

Здесь и далее рисунки И.Д.Любимова.

* Жирмунский А.В., Гомелюк В.Е., Яковлев Ю.М. Жизнь моря. Дальний Восток. (Художники П.И.Замиховский, И.Д.Любимов). Вып.1. М., 1986. 16 открыток; Вып.2. М., 1989. 16 открыток.

скрупулезным поискам в Интернете, но главное — благодаря откликам на письма, отправленные библиотекарем Л.Л.Данилкиной в Находку в надежде отыскать родственников и коллег Любимова. Так забытое содержимое старого шкафа позволило восстановить память об удивительном человеке.

Игорь Дмитриевич Любимов родился в 1911 г. в Николаевске (ныне Николаевск-на-Амуре). Уже тогда это был относительно крупный город-порт с корабельными верфями, рыболовным флотом. В 1914 г. он стал административным центром Сахалинской обл. Отец Игоря был учителем русского языка и литературы, высокообразованной была и мать — дочь инженера, переехавшего на Дальний Восток из Франции. В доме говорили на французском языке, воспитанием Игоря занималась его бабушка по матери. В Гражданскую войну Николаевск сильно пострадал, часть города была намеренно уничтожена разрушительным пожаром, его покинули по меньшей мере две трети жителей. Видимо, в то время переселилась и семья Любимова, они стали жить в Седанке — пригороде Владивостока. Отец скончался рано: возвращаясь домой с работы из города, он простудился и умер от воспаления легких. Мать работала заместителем директора банка во Владивостоке, а затем в Харбине, на Китайской восточной железной дороге. В 1930-е годы ее арестовали и сослали на Исык-Куль. После долгих мытарств, пережив войну и оккупацию (в Калуге), она вернулась к сыну и его семье.

Уже школьником Игорь увлекся биологией, в кружке юных краеведов при местном отделении Географического общества, куда мальчик ходил в конце 1920-х годов, он выполнял работу по фаунистическому составу рыб р.Седанки. В кружке собрался уникальный коллектив педагогов: там преподавали географ и писатель В.К.Арсеньев, ихтиолог Г.У.Линдберг, зоолог-герпетолог А.А.Емельянов, археолог А.И.Разин и другие известные ученые. Об ученической работе Игоря высоко отзывался его друг, ихтиолог А.Я.Таранец*. Окончив школу, Игорь поступил в только что открытый Дальневосточный институт рыбной промышленно-



Азиатский прибрежный краб (*Hemigrapsus sanguineus*), самец.

сти (Дальрыбвтуз), на технологический факультет «с консервным и утилизационным уклонами». Из-за нехватки средств институт в 1933 г. был расформирован, и заканчивать обучение пришлось во Владивостокском рыбохозяйственном техникуме, где Любимов получил диплом инженера-технолога. Во время обучения он проходил практику на Камчатке и на Сахалине. Часть практики проходила в Охотском море, на печально известном Тауйском дельфиньем заводе, построенном японскими концессионерами. Там обрабатывали туши тюленей и белух. Деятельность промышленников тогда привела к исчезновению локального стада белухи. Позже, после окончания войны, Любимов на неделю съездил в Японию. О цели той поездки в семье не говорили, но, вероятно, она была связана с отбором оборудования для рыбохозяйственных цехов по репарации (по-видимому, эти сведения до сих пор засекречены).

После получения диплома Любимов работал на краболовном судне. В 1940 г. он перешел на Тафуинский рыбокомбинат, на должность инспектора по качеству рыбопродуктов. С началом войны на это предприятие легла ответственность по заготовке консервированной продукции для фронта. Многие сотрудники ушли на фронт, сейнера выходили в море в любую погоду и нередко ловили в сети японские мины. С полной отдачей приходилось работать и в море, и на берегу. Любимов не попал на фронт по состоянию здоровья. В 1943 г. Игорь Дмитриевич вступил в ВКП(б) и возглавил партийную организацию консервного цеха. Любимов награжден медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне», позже ему было присвоено звание «Ветеран труда». На рыбокомбинате в Тафуине

* Таранец А.Я. Пресноводные рыбы бассейна северо-западной части Японского моря. Л., 1936. С.483–540. (Тр. ЗИН АН СССР. Т.4, вып.2).



И.Д.Любимов на краболовном судне. 1939 г.

(позднее поселок Южно-Морской, ныне — микрорайон Находки) Любимов оставался до 1953 г., когда был направлен в командировку на Балтику, где помогал наладить работу Калининградского рыбокомбината. Вернувшись в Приморье, Любимов переехал в Находку, где до 1975 г. работал начальником Находкинского пункта государственной торговой инспекции и преподавателем на курсах повышения квалификации рыбопромышленников, а позднее, после выхода на пенсию, вернувшись в Тафуин, продолжил работать технологом. Игорь Дмитриевич ушел из жизни в 1990 г.

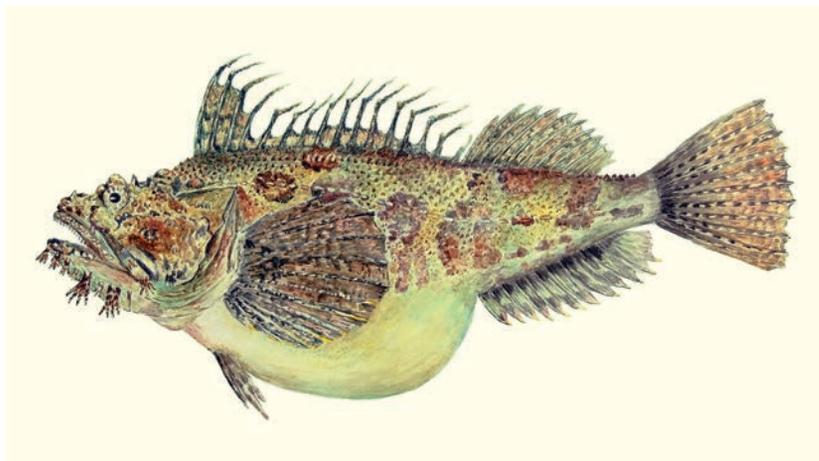
Любимов не ограничивал свои интересы службой. В период работы в Тафуине он на общест-

венных началах возглавлял театральный коллектив клуба имени А.И.Микояна, где ставили пьесы У.Шекспира и А.Н.Островского. Также руководил расположенной в клубе типографией, выпускавшей местную газету «Знамя сталинцев» («Тафуинский рыбак»). В Находке был внештатным лектором общества «Знание», владел обширной библиотекой, которой позволял пользоваться всем желающим, коллекционировал почтовые марки и монеты. Неутомимый натуралист, Любимов собрал также богатую коллекцию жуков и бабочек Приморского края, с этой коллекцией посещал местные школы. Однако главным увлечением Игоря Дмитриевича и основным его наследием стали рисунки. Любовь к рисованию он

мог унаследовать от бабушки, но художественного образования не получил, оставался самоучкой. В семье хранятся тщательные зарисовки комнатных растений и полевых цветов, выполненные цветным карандашом пейзажи, но самое ценное — те листы, на которых Любимов изображал представителей фауны дальневосточных морей.

Внучка Игоря Дмитриевича, Н.Ю.Пежемская (Любимова), вспоминает, что на ее вопрос, заданный в 1979 г., зачем он рисует рыб, дедушка ответил: *Нет хорошего атласа-определителя фауны Японского моря, все сведения разбросаны, и поэтому я хочу систематизировать животных нашего моря.* Когда началась работа по созданию рисунков,

родные художника не помнят, но, видимо, наиболее активно Игорь Дмитриевич начал заниматься ими уже на седьмом десятке лет своей жизни. На рисунках, найденных на биологическом факультете МГУ, стоят даты с 1972 по 1981 г. Это даты выполнения эскизов, на основании которых позднее были подготовлены окончательные изображения. Все рыбы и беспозвоночные выглядят живыми, Любимов и в самом деле зарисовывал их сразу после вылова, пока не изменилась форма, не потускнела окраска. В отноше-



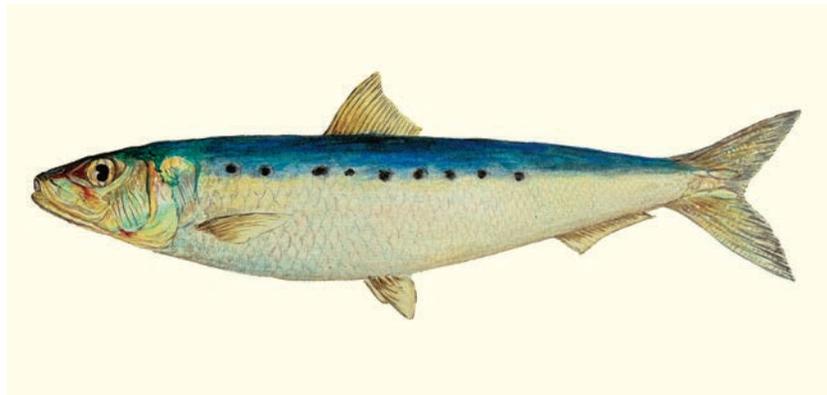
Волосатая рогатка (*Hemitripterus villosus*), выловлена тралом в заливе Петра Великого.

нии к объектам Любимов поступал как Одюбон: он не только рисовал самую свежую «натуру», не только старался представить рыб и кальмаров такими, какими они были в своей родной стихии, но и изображал их в натуральную величину, даже если для этого приходилось склеивать несколько листов бумаги. Масштаб проделанной работы еще предстоит оценить. В серию, найденную в МГУ и позднее переданную (с согласия родственников Любимова) в Государственный Дарвиновский музей, вошли 32 листа, где изображены без малого 90 объектов. В Музейно-выставочном центре Находки хранятся еще 36 рисунков. По эскизам 32 работ выполнены открытки серии «Жизнь моря. Дальний Восток». Богатая коллекция рисунков осталась в семье художника. Много рисунков с изображениями морской фауны Любимов раздаривал знакомым, сохранились его произведения и в лаборатории консервного завода в бывшем Тафуине.

По воспоминаниям родственников, Любимов часто выходил в море на рыболовных судах, отбирая для эскизов еще трепещущий улов, и, если интересные рыбы попадались при ночном лове, рисовал и ночью, не откладывая, ведь к утру окраска уже могла измениться. Рисунки выполнялись не только на глаз, но и с использованием кронциркуля для точной передачи как размеров и пропорций рыбы, так и всех особенностей узора на коже или чешуе. За дополнительным материалом и за консультациями специалистов он обращался на биологическую станцию «Восток», где в аквариумах содержались многие представители морской фауны. Заядлый рыболов, на пенсии Любимов любил проводить время с удоч-



Тихоокеанская россия (*Rossia pacifica*), самец.



Дальневосточная сардина (*Sardinops melanostictus*).



Мелкочешуйная краснопёрка-угай (*Tribolodon brandtii*), выловлена в р.Волчанке (Душкинской).

кой на р. Волчанке (Душкинской), выловленных рыб также нередко зарисовывал.

Тщательность исполнения работ поражала знакомых Игоря Дмитриевича. Его коллега М.В. Бухарева так написала о рисунке промысловой камбалы, подаренном Любимовым родному предприятию: *Сколько нужно иметь умения, терпения, усидчивости, чтобы каждую чешуйку нанести на полотно, а их не одна сотня, а то и тысяча.* Старший сотрудник Национального научного центра морской биологии Дальневосточного отделения РАН (ранее — Института биологии моря) Ю.М. Яковлев, познакомившийся с И.Д. Любимовым на биостанции «Восток» в начале 1980-х годов, признавал, что некоторые из рисунков *были настолько реалистично выполнены, что сразу возникло желание увидеть их на страницах какого-нибудь издания.*

Убежденный просветитель, Любимов создавал рисунки, чтобы другие люди не только любовались красотой обитателей моря, но и научились разбираться в них. При встрече с Любимовым Яковлев посетовал, что, *несмотря на большое разнообразие рыб российского сектора Японского моря, в крае нет доступных для населения хорошо иллюстрированных справочников и определителей.* Вскоре Любимов принес подборку своих работ директору Института биологии моря А.В. Жирмунскому, который поручил Яковлеву изыскать возможность опубликования этих рисунков, сразу предупредив, что возникнет много сложностей. Действительно, из-за загруженности типографий и дороговизны качественной цветной печати оказалось, что надежд на опубликование рисунков Любимова в формате атласа нет. Тогда у Яковлева появилась идея опубликовать рисунки в формате почтовых открыток, выпускавшихся в те годы в хорошем качестве и большими тиражами. Издательство «Изобразительное искусство» заинтересовалось работами дальневосточного художника. Формат открыток позволял размещать на обратной стороне краткие аннотации. Текст к рисункам беспозвоночных составил Ю.М. Яковлев, текст к рисункам рыб — их-

тиолог В.Е. Гомелюк, а А.В. Жирмунский написал вступительную статью. Для печати рисунки требовалось уменьшить, нарисовать красочный фон. Эту работу по предложению редактора А.И. Лезина и взял на себя профессиональный художник П.И. Замиховский. Планировали сделать пять выпусков, но удалось опубликовать только два. Из-за развала экономики страны продолжение издания стало невозможным. Опубликованные открытки, конечно, не передают всей уникальности рисунков: при копировании и печати потерялась та скрупулезная детальность, которая отличает оригинальные работы.

До последнего времени широкая публика не видела оригинальных рисунков Любимова, но, благодаря обнаружению забытых произведений, его имя и работы вернулись. По окончании выставки на биологическом факультете МГУ рисунки были переданы в Государственный Дарвиновский музей, где их показали на выставке «Сага о рыбаках и рыбке», прошедшей летом 2019 г. Музейно-выставочный центр Находки в 2018 г. подготовил выставку «Обитатели глубин Японского моря» по рисункам Любимова, хранящимся в коллекции этого учреждения. Снова прозвучала идея собрать и опубликовать наследие замечательного художника.

Получить сведения о натуралисте и восстановить его имя удалось благодаря следующим людям. Рисунки найдены и переданы в библиотеку биофака МГУ профессором И.П. Ермаковым. Оформлением выставки и розыском сведений о художнике занимались Л.Л. Данилкина и Т.Б. Маслова. Хранитель музея «Залив Восток» И.В. Ермилова помогла связаться с людьми, лично знавшими И.Д. Любимова. Воспоминания о нем прислали Н.Ю. Пежемская и М.В. Бухарева. О знакомстве с художником и о подготовке публикации его рисунков рассказал Ю.М. Яковлев*. Публикуемые работы хранятся в Дарвиновском музее, фотографии пересланы родственниками и коллегами И.Д. Любимова. ■

* Яковлев Ю.М. Игорь Дмитриевич Любимов // Залив Восток (<http://moyaokruga.ru/zalivostok/Articles.aspx?articleId=142583>).

Audubon from Nakhodka: Life of Igor Lyubimov

P.V. Kvarl'nov
Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Igor Dmitrievich Lyubimov (1911–1990) was a fishery specialist who lived and worked on the Sea of Japan. A talented self-taught artist, Lyubimov created a collection of drawings of fishes and other inhabitants of the Far Eastern seas. His multicolored works illustrate life-sized animals. They remained nearly unknown till the latest years when a series of his drawings was found incidentally at the Faculty of Biology of Lomonosov Moscow State University.

Keywords: Igor Lyubimov, naturalist, artist, Nakhodka, fishes.

Микроэлектроника

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ / Под ред. О.А.Агеева, Б.Г.Коноплева. М.: Наука, 2019. 551 с.

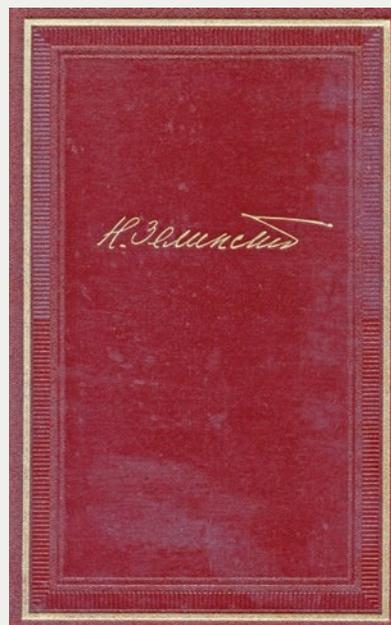


Научно-технический прогресс в значительной степени обусловлен стремительным развитием и широким применением средств радиоэлектроники, автоматики, компьютеров. Создание этих сложных систем было бы невозможным без успехов микроэлектроники. В коллективной монографии представлены результаты междисциплинарных фундаментальных, поисковых и прикладных исследований по разработке технологии получения новых наноматериалов и элементной базы электронных устройств новых поколений информационно-коммуникационных систем. В первых трех главах рассмотрены способы получения вертикально ориентированных углеродных нанотрубок и методика диагностики их параметров. Следующие семь глав посвящены вопросам формирования наноструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии, импульсно-лазерного осаждения нанокристаллических пленок ZnO, формирования монокристаллических подложек карбида кремния, исследования электропроводности полимерных нанокомпозитов и моделирования автоэмиссионных наноструктур на основе пленок графена на карбиде кремния. В главах 11 и 12 показаны возможности практического применения методов проектирования и изготовления сверхбыстродействующих интегральных элементов, многоосевых микромеханических сенсоров.

Химия. История науки

Академик Н.Д.Зелинский. ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ: В 2-х т. 2-е изд., факсимильное. М.: Наука, 2019. Т.1. 664 с.; Т.2. 678 с.

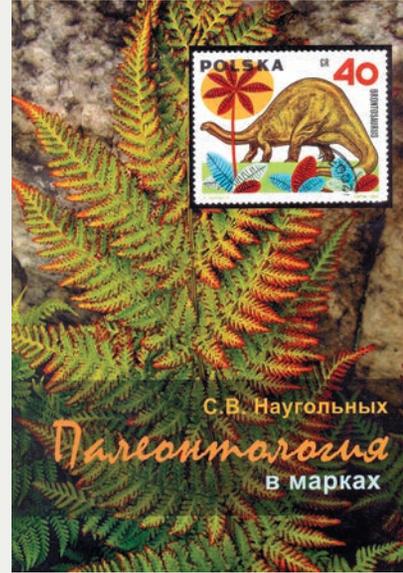
Факсимильное переиздание двухтомника избранных трудов, вышедшего в 1941 г., приурочено к 160-летию юбилею выдающегося отечественного химика-органика, создателя научной школы, одного из основоположников органического катализа и нефтехимии, академика Николая Дмитриевича Зелинского (1861–1953). В первом томе представлены: биографические материалы, первые работы и магистерская диссертация, публикации о стереометрии двусосновых кислот, о синтезе ациклических углеводородов и их производных (темы «Углеводороды», «Кислородные производные») и о химии нефти (темы «Преобразование углеводородов нефти в продукты высшей химической ценности», «Бензинизация нефтяных продуктов», «Дегидрогенизационный анализ как метод исследования нафтен», «Обессеривание бензинов», «Вопросы происхождения нефти»). Во второй том вошли труды, посвященные катализу (темы «Теоретические воззрения на катализ», «Дегидрогенизационный катализ», «Каталитическая гидрогенизация», «Необратимый катализ», «Каталитическая изомеризация», «Катализ хлористым аммонием», «Разнообразные каталитические реакции»), синтетическому каучуку, аминокислотам и белкам, физической химии, и статьи по разным вопросам, объединенные в «Общий раздел».



Палеонтология

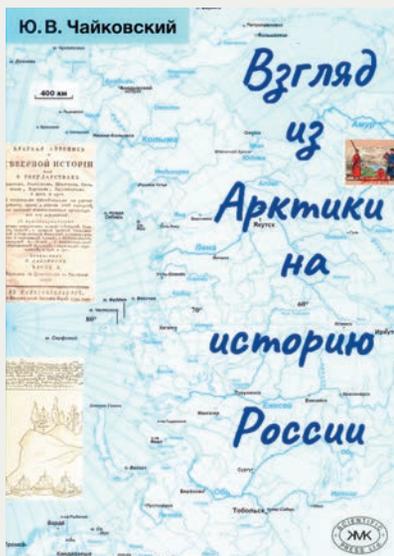
С.В.Наугольных. ПАЛЕОНТОЛОГИЯ В МАРКАХ. М.: Медиа-гранд, 2019. 147 с.

Прекрасный подарок любителям палеонтологии и филателии сделал постоянный автор нашего журнала Сергей Владимирович Наугольных. В книге есть и научно-популярные рассказы о важнейших событиях прошлого Земли и жизни доисторических организмов, и фотографии окаменелостей, и изображения почтовых марок с вымершими животными и растениями. Это не филателистический каталог, поскольку марки для автора — это художественные миниатюры, которые он использует лишь как иллюстрации. Главы книги («Не только о марках», «Эволюция», «Первые и самые первые. Говорим “строматолиты”, а думаем “бактерии”», «Трилобиты и другие обитатели раннекембрийских морей», «Время рыб, или Из моря — на сушу», «Мир девонского периода», «Тропические леса юной Земли», «Пеликозавры. “Ящеры под парусами”», «Царство ящеров, гигантских и не очень», «Палеоихнология, или Снова по следам динозавров», «Тайны меловых скал», «Мезозой — расцвет голосеменных», «Про теплых, пушистых и умных, или Социализация биосферы», «Палеонтология человека и геoarхеология плейстоцена», «Окаменелости как часть общечеловеческой культуры») различаются по объему и стилю изложения. Они отражают интересы и пристрастия автора, а темы, по которым материал еще собирается, представлены конспективно.



История. География

Ю.В.Чайковский. ВЗГЛЯД ИЗ АРКТИКИ НА ИСТОРИЮ РОССИИ: Очерки. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2020. 352 с.



Первые пять глав новой книги Юрия Викторовича Чайковского — это переработанные очерки его ранней книги «Мысы Ледовитого наименования» (2015). Они дополнены тремя новыми главами («Кто бывал раньше и дальше всех», «Ряды, инвариации и триады», «Экспедиция знаменитая, но нескладная»), которые так же, как и первые пять глав, посвящены малоизвестным проблемам Российской Арктики, загадкам, нерешенным и спорным вопросам истории путешествий и открытий. Автор стремится выявить природные и политические основы событий, используя девять методических приемов, применявшихся им в собственных исследованиях эволюционного процесса. Это: сопоставление загадок (попытка понять все непонятности данной темы вместе); умение выявлять серийные факты; погружение исследуемого явления в его эпоху; выявление правды в потоке лжи (истина самосогласованна, свидетельство пишущего против себя можно полагать правдой); выявление ядра (того общего, что имеется во всех версиях, и того, что непротиворечиво внутренне) и периферии; реконструкция событий; использование при реконструкции явления не серийных фактов, а лишь достоверных свидетельств о нем; начало работы с изучения явления, а не с мнений о нем; презумпция правдивости сведений.

Нефтяная геология

А.Н.Дмитриевский. ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ: В 7 т. Т.5: Нефтегазовый комплекс Западной и Восточной Сибири. М.: Наука, 2019. Кн.1: Нефтегазовый комплекс Западной Сибири. 436 с.; Кн.2: Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Восточной Сибири. 455 с.

Выпуск семитомника «Избранных трудов» академика А.Н.Дмитриевского издательство «Наука» начало в 2008 г. В первой книге пятого тома публикации (статьи и монографии) распределены по четырем разделам, а во второй — по трем. В разделе 1 собраны работы, связанные с нефтяной и газовой промышленностью Западной и Восточной Сибири на рубеже XX и XXI вв. Приведены данные о состоянии и развитии минерально-сырьевой базы нефтяной и газовой промышленности восточных регионов страны и показано ее значение для обеспечения энергетической безопасности и создания нефтяных и газовых энергокоммуникаций. Раздел 2 посвящен разработке газовых и газоконденсатных месторождений Западной Сибири. Обоснованы новые научно-технические решения по совершенствованию систем разработки и эксплуатации гигантских месторождений. Раздел 3 объединяет труды об углеродном потенциале доюрского комплекса Западной Сибири. Выделены магматогенно-осадочные перспективные нефтегазовые образования триаса, приведена принципиальная модель формирования нефтяных и газовых скоплений в трещиновато-кавернозных массивных породах. В работах, представленных в разделе 4, рассказывается о перспективах освоения нефтегазовых ресурсов акваторий арктических и дальневосточных морей. Дан прогноз развития сырьевой базы и добычи углеводородов на шельфе России до 2030 г. В раздел 5, открывающий вторую книгу, вошли публикации о геологическом строении и об истории формирования осадочных бассейнов Восточной Сибири. Обоснованы перспективы нефтегазоносности верхнепермских и мезозойских отложений Вилюйско-Привернеянского осадочного бассейна. Работы, собранные в разделе 6, посвящены изучению природных резервуаров нефти и газа. Рассмотрены вулканогенные природные резервуары Якутии, уделено внимание новому типу пород-коллекторов — перспективным низкопористым и слабопроницаемым карбонатным породам кембрийских отложений юга Сибирской платформы, а также региональным тенденциям изменения коллекторских свойств нижнетриасовых отложений Хапчагайского мегавала. Раздел 7, завершающий вторую книгу и весь пятый том, объединяет публикации о перспективах нефтегазоносности осадочных бассейнов Восточной Сибири. Показано строение и условия формирования нефтегазоносных комплексов юга и юго-востока региона, рассмотрены нефтегазоносные зоны западной части Якутии, предложены перспективные направления поисков залежей в Непско-Чонской нефтегазовой области.



В статье **А.В.Бялко «Зодиакальный свет»** (№6. С.22–31) на с.23 вместо слов «Гигантского столкновения ПротоЗемли с Тефией» следует читать «Гигантского столкновения ПротоЗемли с Тейей*».

* Тефия — спутник Сатурна, открытый Джованни Кассини в 1684 г.; Тейя — гипотетическая древняя планета, исчезнувшая в столкновении с Землей 4.5 млрд лет назад.

Издательство предлагает услуги по редакционно-издательской подготовке материалов, сборников, а также весь комплекс полиграфических услуг

Издательство «Наука» готово оказать услуги под ключ по организации и проведению семинаров, конференций, презентаций, выставок в конференц-залах и на экспозиционных площадках издательства по адресам:

г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Московская обл., г. Люберцы, Октябрьский пр-т, д. 403

По всем интересующим вопросам обращайтесь по тел.: +7(495)276-7735
Подробная информация на сайте www.naukapublishers.ru/history/partnership

ПРИРОДА 7/2020

Соучредители: РАН, ФГУП «Издательство «Наука»
Главный редактор: А.В.Лопатин
Заместитель главного редактора: А.В.Бялко

Ответственный секретарь
Е.А.Кудряшова

Научные редакторы
М.Б.Бурзин
Т.С.Клювиткина
Н.В.Ульянова
О.И.Шугова

Литературный редактор
Е.Е.Жукова

Заведующая редакцией
И.Ф.Александрова

Перевод содержания
Т.А.Кузнецова

Графика, верстка:
С.В.Усков

Подписной индекс: 70707
Дата выхода в свет: 17.07.2020
Формат 60×88 1/8. Цифровая печать
Усл. печ. л. 10.0. Уч. изд. л. 10.2
Бум. л. 5
Тираж 1000 экз.
Цена свободная
Заказ 21

Редакция и издатель: ФГУП «Издательство «Наука»
Адрес: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
По вопросам публикации материалов:
тел.: (495) 276-77-35 (доб. 4171),
e-mail: priroda@naukaran.com
По вопросам сотрудничества:
тел.: (495) 276-77-35 (доб. 4301 или 4291),
e-mail: journals@naukaran.com
Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука»
Адрес: 121099, Москва, Шубинский пер., 6.

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом Совета министров СССР по печати 13 декабря 1990 г.
Свидетельства о регистрации №1202 и ПИ №1202.
Все права защищены. Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.
Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.
Ответственность за точность и содержание рекламных материалов несут рекламодатели.

12+

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ ЖУРНАЛЫ ТЕПЕРЬ ДОСТУПНЫ ВСЕМ



Уважаемые коллеги!

Открыта подписка для физических лиц
на номера 2020 г. научно-популярных журналов
«Земля и Вселенная», «Природа»,
«Энергия: экономика, техника, экология»

Журнал «Земля и Вселенная»

Стоимость годового комплекта (6 номеров) 1200 руб.

Редакция журнала

Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 42-31)

E-mail: zevs@naukaran.com

Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Журнал «Природа»

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3000 руб.

Редакция журнала

Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 41-71)

E-mail: priroda@naukaran.com

Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Журнал «Энергия: экономика, техника, экология»

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3000 руб.

Редакция журнала

Тел.: +7 (495) 362-07-82

E-mail: energy@iht.mpei.ac.ru

ул. Красноказарменная, 17а

Журналы также можно приобрести в розницу в сети
магазинов «Академкнига» по следующим ценам:

«Земля и Вселенная» – 220 руб.

«Природа» – 270 руб.

«Энергия: экономика, техника, экология» – 270 руб.

реклама

Подписаться можно в редакциях указанных журналов.
Убедительная просьба связаться с редакциями перед визитом.

В случае возникновения вопросов можно также обращаться
в Управление по выпуску журналов ФГУП «Издательство «Наука»:
Тел.: +7(495)276-77-35 (доб. 43-01)
E-mail: journals@naukaran.com

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "НАУКА"

ПО 50 РУБ.

акция проводится в сети магазинов "Академкнига"
и в интернет-магазине naukabooks.ru



ЕЩЕ БОЛЬШЕ КНИГ И БОЛЬШЕ СКИДОК

ДО 80%

акция проводится в сети магазинов "Академкнига"
и в интернет-магазине naukabooks.ru

условия акций на сайте naukabooks.ru