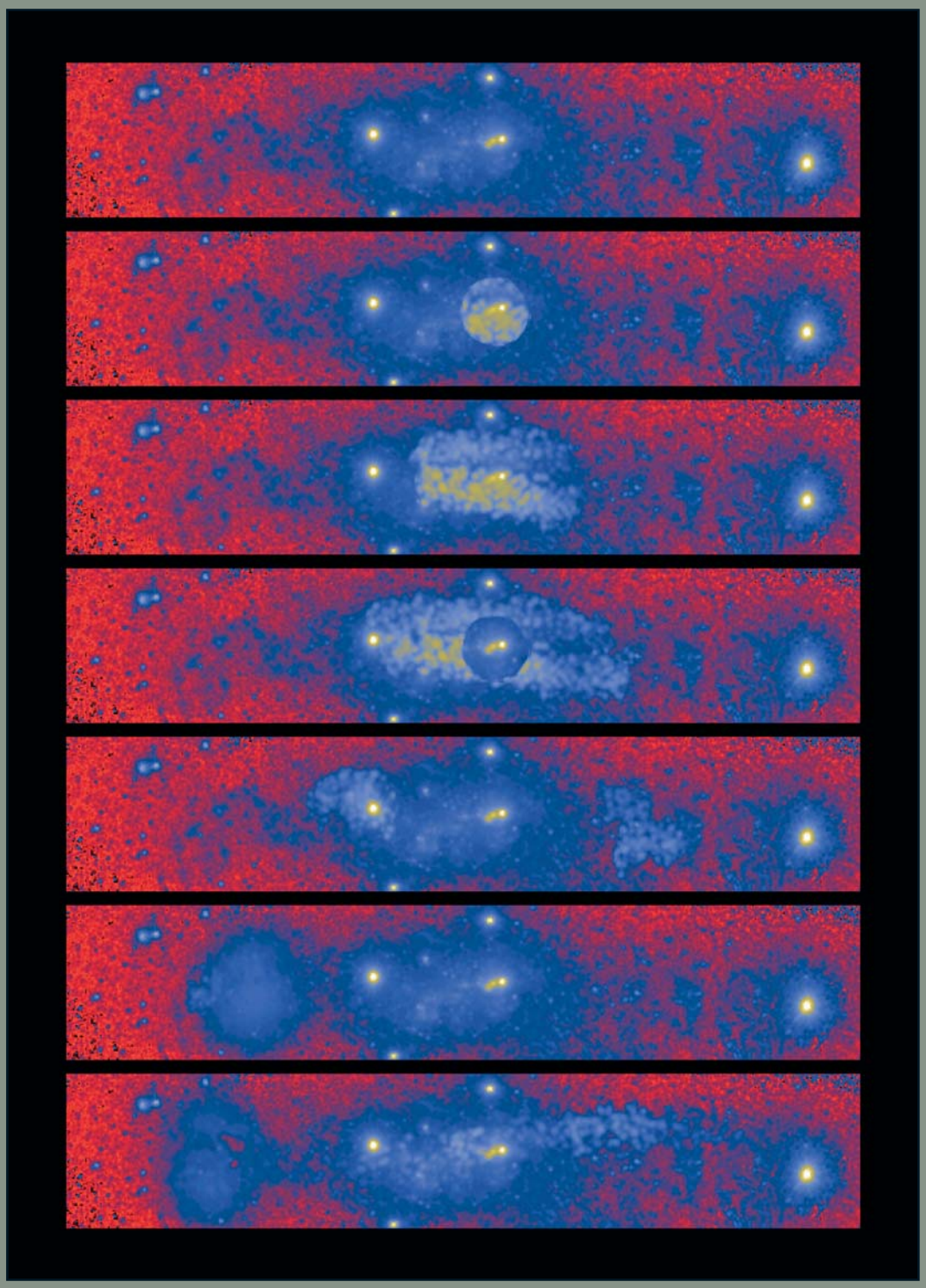
ISSN 0032-874X

# ПРИРОДА

10 17



ПРИРОДА

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
Издается с января 1912 года

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

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

доктор биологических наук **А.С.Апт**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Арискин**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **П.И.Арсеев**, **О.О.Астахова**, доктор биологических наук **Ф.И.Атауллаханов**, член-корреспондент, доктор юридических наук **Ю.М.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**, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, профессор **Е.Кунин** (**E.Koonin**, США), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Леин**, член-корреспондент, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов** (**Sh.Mitalipov**, США), доктор геолого-минералогических наук **Т.К.Пинегина**, доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, кандидат географических наук **Ф.А.Романенко**, академик, доктор физико-математических наук **А.Ю.Румянцев**, член-корреспондент, доктор биологических наук **Н.И.Санжарова**, доктор физико-математических наук **Д.Д.Соколов**, кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина**, кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина**, **Н.В.Ульянова**, академик, доктор биологических наук **М.А.Федонкин**, академик, доктор физико-математических наук **А.Р.Хохлов**, академик, доктор физико-математических наук **А.М.Черепащук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибаев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Компьютерная модель, иллюстрирующая распространение вспышки рентгеновского излучения по молекулярному газу в центре Галактики в течение 400 лет.
См. в номере: **Чуразов Е.М., Хабибуллин И.И., Сюняев Р.А.**
*Хроники черной дыры, записанные в молекулярных облаках.*
Изображение предоставлено авторами

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Можжевельник Пржевальского (*Sabina przewalskii*). Возраст этих деревьев может достигать тысячи лет.
См. в номере: **Даценко Н.М., Сонечкин Д.М., Кин Ч., Лиу Дж.-Дж., Янг Б.**
*Годичные кольца китайского можжевельника: уникальная летопись климата.*
Фото Ч.Кина

«Наука»

© Российская академия наук, журнал «Природа», 2017
© ФГУП «Издательство «Наука», 2017
© Составление. Редколлегия журнала «Природа», 2017

# В НОМЕРЕ:


**3** **ФИЗИКА НА ЛЮБОЙ РАЗМЕР**

Посвящается 101-й годовщине со дня рождения В.Л.Гинзбурга

**А.М.Черепащук, А.Д.Чернин**

**Список Гинзбурга: гравитационные волны, черные дыры, темная энергия (4)**

*В своем перечне самых важных физических и астрофизических проблем ВЛ.Гинзбург отводил особое место релятивистской астрофизике и космологии. Фундаментальные идеи в этой области науки получили дальнейшее развитие в теоретических и наблюдательных исследованиях последних лет.*

**Е.М.Чуразов, И.И.Хабибуллин, Р.А.Сюняев**

**Хроники черной дыры, записанные в молекулярных облаках (21)**

*Сверхмассивная черная дыра в центре нашей Галактики и гигантские молекулярные облака, разбросанные по области в сотни световых лет, могут многое рассказать друг о друге. Облака хранят информацию о вспышках рентгеновского излучения от черной дыры, случившихся сотни лет назад, а вспышки «высвечивают» внутреннее устройство молекулярных облаков.*

**Д.Д.Соколов**

**Как измеряют магнитные поля галактик**

От книги В.Л.Гинзбурга до фарадеевского синтеза **(30)**

*Магнитные поля галактик измеряют с помощью эффекта Фарадея, т.е. вращения плоскости поляризации в оптически активной среде, роль которой в данном случае играет замагниченная плазма. Способы интерпретации данных фарадеевского вращения в целях изучения галактик прошли за почти полвека путь от первых успешных попыток их применения до современных изощренных методов.*

**А.И.Буздин, А.С.Мельников**

**Физика взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма (37)**

*Электродинамический и обменный механизмы взаимодействия магнетизма и сверхпроводимости приводят к новым интересным эффектам в естественных ферромагнитных сверхпроводниках и искусственных гибридных структурах. Присутствие доменной структуры в ферромагнетике существенно модифицирует структуру сверхпроводящего состояния.*

**В.М.Фридкин**

**Новая жизнь теории среднего поля (43)**

*Расхождение между экспериментальными и предсказываемыми теорией Гинзбурга—Ландау значениями коэрцитивного поля объясняется доменной структурой сегнетоэлектриков. Настоящее собственное переключение, описываемое теорией среднего поля, удалось наблюдать лишь в конце прошлого века, когда научились получать ультратонкие монокристаллические сегнетоэлектрические пленки.*

**48** **Н.М.Даценко, Д.М.Сонечкин, Ч.Кин, Дж.-Дж.Лиу, Б.Янг**

**Годичные кольца китайского можжевельника: уникальная летопись климата**

*На Тибетском плато растут можжевельники, возраст которых может достигать тысячи лет. Они были свидетелями крупных извержений вулканов и следовавших за ними периодов упадка и возрождения древних цивилизаций. Кольца годичных приростов этих деревьев позволяют ученым датировать и изучать такие события.*

**55** **А.М.Корженков, А.А.Варданян, Р.Ю.Стаховская**

**Следы землетрясения в пещерном городе Вардзиа**

*Строительство в Грузии в XII–XIII вв. пещерного города Вардзиа с многочисленными помещениями проводилось специально, чтобы скрыть его от врагов. Однако в 1283 г. сильное землетрясение разрушило большую часть города и обнажило все его внутренние строения.*

**Научные сообщения**

**63** **Л.Я.Кизильштейн**

**Золото и органическое вещество земной коры**

**Заметки и наблюдения**

**66** **К.Г.Михайлов, П.Р.Ноговицын**

**Паук-серебрянка выходит из воды? (66)**

**В.Г.Колокольцев**

**Кувыркающиеся железомарганцевые конкреции на дне Финского залива (71)**

**Времена и люди**

**74** **Б.В.Булюбаш**

**Открытия и предчувствия физика Вильгельма Вебера**

**Наука и общество**

**84** **А.Б.Соколов, Е.М.Власова, С.А.Боринская, Ю.Е.Березкин**

**Мифы о происхождении человека**

**92** **Некролог**

**Об Алексее Андреевиче Ярошевском**

**93** **Новые книги**

# CONTENTS:


**3** **ALL-SIZE PHYSICS**
Dedicated to the 101st Anniversary of the Birth of V.L.Ginzburg

**A.M.Cherepashchuk, A.D.Chernin**
**Ginzburg's List: Gravitational Waves, Black Holes, and Dark Energy (4)**
*In his list of important problems in physics and astrophysics V.L.Ginzburg made the emphasis to relativistic astrophysics and cosmology. The fundamental ideas in this area of science found further development in recent theoretical and observational studies.*

**E.M.Churazov, I.I.Khabibullin, R.A.Sunyaev**
**Chronicles of Supermassive Black Hole, Written in Molecular Clouds (21)**
*A supermassive black hole in the central region of our Galaxy and giant molecular clouds scattered over few hundred light-years region can tell us a lot about each other. The clouds keep record of powerful X-ray flares from the black hole that happened hundreds years ago; and the same flares help us to understand the inner structure of the molecular clouds.*

**D.D.Sokoloff**
**Measuring Galactic Magnetic Fields**
From Ginzburg's Book up to Faraday Synthesis **(30)**
*Magnetic fields of galaxies are measured using Faraday effect, i.e. rotation of polarization plane in optically active media, the role of the latter was played by magnetized plasma. The methods for interpretation of the Faraday rotation data in galactic studies developed from the first successful attempts of their application a century ago up to contemporary sophisticated methods.*

**A.I.Buzdin, A.S.Mel'nikov**
**Physics of Interplay Between Superconductivity and Magnetism (37)**
*Electrodynamic and exchange mechanisms of interaction between superconductivity and magnetism manifest themselves in many exciting phenomena in ferromagnetic superconductors and artificial hybrid structures. The presence of a domain structure in a ferromagnet results in additional interesting peculiarities of the superconducting state.*

**V.M.Fridkin**
**New Life of the Mean Field Theory (43)**
*The discrepancy between experimental and predicted by the Ginzburg—Landau theory values of coercive electric field is explained by the domain structure of ferroelectrics. A true intrinsic switching described by the mean field theory was observed in the end of the previous century only when ultrathin ferroelectric films had been obtained.*

**48** **N.M.Datsenko, D.M.Sonechkin, C.Qin, J.-J.Liu, B.Yang**
**Annual Tree-Rings of Chinese Junipers — a Unique Chronicle of the Climate**
*Junipers whose age can reach thousands of years grow on the Tibetan Plateau. They witnessed large eruptions of volcanoes and the following periods of decline and revival of ancient civilizations. The rings of annual increments of these trees allow scientists to date and study such events.*

**55** **A.M.Korzhenkov, A.A.Vardanyan, R.Yu.Stakhovskaya**
**Traces of Medieval Earthquake in Vardzia Cave City**
*The construction of the cave city Vardzia with numerous building in Georgia in the XII–XIII centuries was specially designed to hide it from enemies. However, in 1283 a strong earthquake destroyed most of the city and exposed all its internal buildings.*

**Scientific Communications**
**63** **L.Ya.Kizelshtein**
**Gold and Organic Matter of the Earth Crust**

**Notes and Observations**
**66** **K.G.Mikhailov, P.R.Nogovitsyn**
**Water Spider Comes out from the Water? (66)**

**V.G.Kolokoltsev**
**Tumbling Ferromanganese Nodules on the Bottom of the Gulf of Finland (71)**

**Times and People**
**74** **B.V.Bulyubash**
**Discoveries and Anticipations of the Physicist Wilhelm Weber**

**Science and Society**
**84** **A.B.Sokolov, E.M.Vlasova, S.A.Borinskaya, Yu.E.Berezkin**
**Myths about the Descent of Man**

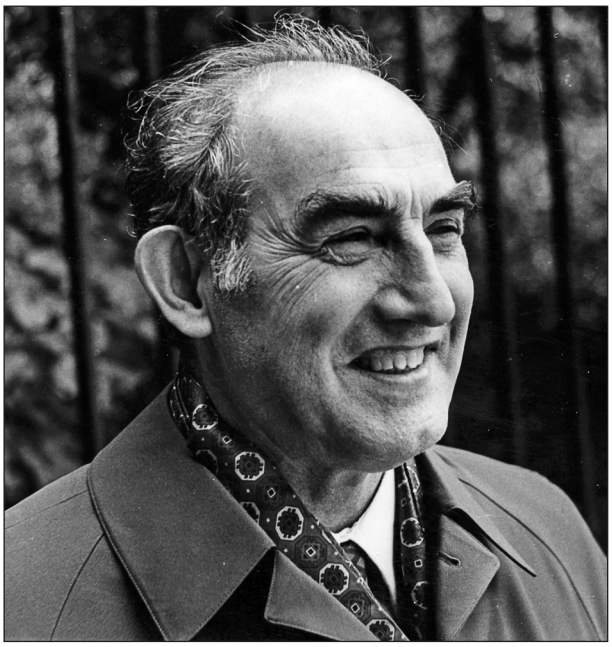
**92** **Obituary**
**About Aleksei Andreevich Yaroshevskii**

**93** **New Books**

# Физика на любой размер

## Посвящается 101-й годовщине со дня рождения В.Л.Гинзбурга

**В этом номере мы отмечаем столетие нобелевского лауреата академика Гинзбурга с погрешностью в 1%, что вполне в духе юбиляра. Владея всеми тонкостями математического аппарата, Виталий Лазаревич, по мнению коллег и учеников, был настоящим виртуозом оценок. Так проявлялась его глубокая научная интуиция, которая позволяла ему уловить физическую суть феномена, из общих соображений представить его масштаб, найти простой подход к сложной задаче и получить нетривиальные результаты уже с помощью оценок. И практически уже утраченная современными учеными способность видеть неожиданные параллели в различных явлениях, понимать их полную картину, ощущать настоящее единство природы. Подобный универсальный подход был для Гинзбурга естественным фундаментом исследований. Свой знаменитый Список самых важных проблем физики и астрофизики он считал не только указателем многообещающих направлений научного поиска, но и своего рода «физминимумом», представление о котором должен иметь любой физик. Да и не только ученый — Виталий Лазаревич огромное значение придавал распространению научных знаний. Каждый год выходила по меньшей мере одна-две его научно-популярные статьи, причем он не упускал возможности публиковать их даже в многотиражках. К сожалению, теперь мало кто может похвастаться сравнимыми успехами в популяризации науки. Так, в данной подборке вы не найдете ни одной статьи прямых научных наследников Виталия Лазаревича — сотрудников Теоретического отдела Физического института имени П.Н.Лебедева Академии наук (ФИАН), в котором тот проработал (в том числе и в качестве заведующего) всю свою жизнь. Не будем скрывать: нам становится все труднее убедить ученых написать для «Природы». Понятно, что сейчас они поставлены в тяжелые, зачастую просто абсурдные условия, когда приходится в большей степени работать не на результат, а на отчет. Когда провозглашенные лозунги «освобождения научных сотрудников от несвойственных им функций» обернулись своей противоположностью — настоящим бюрократическим «крепостничеством», обложившим ученых бумаготворческим оброком, регламентирующим каждый шаг, вплоть до планирования точного числа будущих статей в журналах с заданным уровнем цитирования. И получается, что научно-популярная статья, которую писать сложнее, чем специальную, в зачет не идет. Остается только надеяться, что погоня за отчетными показателями не вытеснит окончательно из научной деятельности ее главного стержня — того любопытства, которое и делает человека таковым, — потребности понять, как устроен окружающий мир. Именно эта мотивация наполняла жизнь Виталия Лазаревича Гинзбурга, оставившего весомый научный вклад в самых разных областях теоретической физики, которые охватывают весь набор масштабов процессов во Вселенной. Очень интересно было бы взглянуть на успехи сегодняшней мировой науки, пройдясь по всем пунктам Списка, и, возможно, когда-то удастся организовать издание подобного фолианта. Нам же по понятным причинам приходится ограничиться лишь отдельными моментами...**



Академик Виталий Лазаревич Гинзбург
(4.10.1916 — 08.11.2009)

# Список Гинзбурга: гравитационные волны, черные дыры, темная энергия

А.М.Черепащук[1], А.Д.Чернин[1]
[1]*Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)*

Список Гинзбурга — краткая сводка проблем физики и астрономии, которые представлялись академику Виталию Лазаревичу Гинзбургу (1916–2009) самыми важными, интересными и актуальными. Составленный им впервые в 1971 г. список обновлялся со временем в течение трех десятилетий, отражая как прогресс науки, так и ее новые перспективы, ключевые задачи на будущее. Позднейший вариант Списка был включен Гинзбургом в его Нобелевскую лекцию (2003). Астрофизика с самого начала присутствовала в Списке среди основных его тем. Особое место Гинзбург отводил релятивистской астрофизике и космологии, полагая, что общая теории относительности (ОТО) служила и служит надежной теоретической основой для предсказаний и открытий в физике и астрономии. Фундаментальные идеи в этой области науки получили дальнейшее развитие в теоретических и наблюдательных исследованиях последних лет. Проблема динамики Вселенной, которую Гинзбург считал «основным вопросом космологии», нашла наблюдательное решение в 1998–1999 гг., когда на глобальных космологических расстояниях была открыта темная энергия, обнаружившая себя в ускоряющемся расширении Вселенной. Другим важнейшим недавним достижением стало наблюдательное открытие в 2015–2017 гг. гравитационных волн, предсказанных ранее ОТО. Этот результат служит вместе с тем новым сильным аргументом в пользу существования черных дыр, также предсказываемых ОТО.

**Ключевые слова:** Общая теория относительности, черные дыры, гравитационные волны, нейтронные звезды, темная энергия, космология.

*Предсказывать трудно. Особенно будущее.*
Народная мудрость

В 1971 г. Виталий Лазаревич Гинзбург опубликовал в журнале «Успехи физических наук» [1] список проблем физики и астрономии, которые представлялись ему тогда самыми важными, интересными и актуальными. Это был не обзор текущих научных достижений, а, скорее, сборник перспективных тем и трудных задач на будущее. Гинзбург говорил, что его Список — «функция времени». И действительно: он не раз обновлялся, отражая меняющиеся со временем цели, приоритеты и направления в науке. Самый поздний вариант Списка был включен в Нобелевскую лекцию Гинзбурга [2]. Хотя свою премию Виталий Лазаревич получил за теорию сверхпроводимости, среди его приоритетов на переднем крае всегда присутствовала астрофизика. Обратимся поэтому к астрофизическому разделу Списка и посмотрим, что из отмеченного в свое время Гинзбургом получило развитие в теоретических и наблюдательных исследованиях последних лет.

© Черепащук А.М., Чернин А.Д., 2017

## Астрофизика и общая теория относительности

Открывая астрофизический раздел Списка 1971 года, Гинзбург замечает, что за 10 лет, предшествовавших этой дате, в астрономии были сделаны открытия «первостепенного значения»: квазары, реликтовое излучение, пульсары. Что можно ожидать в этой науке в последующие годы и десятилетия? Виталий Лазаревич находил самыми перспективными следующие направления исследований.

— Проблему экспериментальной проверки общей теории относительности: она «остается животрепещущей и продолжает находиться в центре внимания. Все указанные Эйнштейном эффекты существуют и наблюдаются, хотя достигнутая точность еще невелика».

— Гравитационные волны: они «должны испускаться любыми массами с отличным от нуля и переменным во времени квадрупольным моментом. Простейшими космическими объектами такого типа являются двойные звезды или планетные системы».

***Анатолий Михайлович Черепащук,*** *академик, доктор физико-математических наук, директор Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (ГАИШ МГУ), заведующий астрономическим отделением физического факультета МГУ. Вице-президент Европейского астрономического общества, член Английского королевского астрономического общества. Занимается исследованием двойных систем, решением обратных задач астрофизики. Член редколлегии журнала «Природа».*

***Артур Давидович Чернин,*** *доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник того же института. Область научных интересов — космология, физика галактик.*

— Основной вопрос космологии: «выяснение самого характера эволюции Вселенной во времени, выбор отвечающей действительности космологической модели. Вселенная в согласии с данными наблюдений представляет собой расширяющуюся систему».

Эти ключевые астрономические пункты Списка сохранялись и в более поздних его версиях, они напрямую связаны с общей теорией относительности (ОТО) Эйнштейна. ОТО служила и служит теоретической основой фундаментальных предсказаний и открытий в физике и астрономии. И точность, с которой регистрируются те или иные ее эффекты, неуклонно повышается. Проблема, названная Гинзбургом в 1971 г. «основным вопросом космологии», нашла убедительное наблюдательное и теоретическое решение на рубеже нового тысячелетия, когда астрономическим наблюдениям стали доступны глобальные космологические расстояния порядка тысяч мегапарсек (Мпк) и более. На этих расстояниях в 1998–1999 гг. была открыта темная энергия, которая проявляет себя в ускоряющемся расширении Вселенной [3, 4]. В 2000–2001 гг. темная энергия была обнаружена также и в Локальной Вселенной — на расстояниях порядка 1 Мпк [5]. Открытие гравитационных волн произошло совсем недавно — в 2015–2017 гг. [6–8].

Хотя у Гинзбурга проблемы гравитационных волн и черных дыр (последние он называл «важнейшими астрономическими и физическими объектами») приведены раздельно, на практике оказалось, что обе они причудливым образам пересекаются: американской обсерваторией LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) были открыты гравитационные волны от слияния черных дыр в двойных системах [6–8]. Поэтому можно рассчитывать на качественно новые результаты, касающиеся физики пространства-времени в экстремально сильных гравитационных полях, важные для выяснения природы черных дыр, а также для понимания механизмов образования двойных черных дыр.

## Удивительная взаимосвязь двух проблем

То, что первые гравитационно-волновые сигналы были открыты от слияния черных дыр (ЧД), а не нейтронных звезд (НЗ) не стало неожиданностью для ученых. Еще в 1997 г. астрофизики из ГАИШ МГУ В.М.Липунов, К.А.Постнов и М.Е.Прохоров предсказали, что обсерватория LIGO первыми должна зарегистрировать сигналы от слияния ЧД. Хотя частота слияния ЧД в двойных системах существенно ниже (~$10^{-5}$–$10^{-6}$ слияний в год на одну стандартную галактику), чем частота слияния НЗ (~$10^{-4}$), для первых выделяется намного большая энергия в виде гравитационных волн (ГВ). Это позволяет регистрировать гравитационно-волновое излучение с гораздо больших расстояний, чем при слиянии НЗ. Поскольку объем пространства пропорционален кубу расстояния, количество доступных для наблюдений сливающихся пар ЧД увеличивается и, соответственно, возрастает вероятность их обнаружения с помощью специальных телескопов. При этом, ввиду влияния эффектов наблюдательной селекции, первыми должны открываться наиболее массивные сливающиеся пары ЧД, что и происходит в действительности.

Открытие гравитационных волн обсерваторией LIGO имеет громадное научное значение, так как оно дает новый канал информации о Вселенной (наряду с электромагнитным, нейтринным каналами, а также каналом космических лучей).

Напомним, что гравитационные волны, предсказанные ОТО, представляют собой поперечные волны кривизны пространства-времени, которые излучаются телами, двигающимися с переменным ускорением, и распространяются со скоростью света. Ввиду слабости гравитационного взаимо-

действия их очень трудно обнаружить. Ученым понадобилось более полувека, чтобы реализовать прямое детектирование ГВ на современных лазерных интерферометрах.

Надо отметить, что В.Л.Гинзбург всячески стимулировал и поддерживал российских ученых (М.Е.Герценштейна, В.И.Пустовойта, В.Б.Брагинского и др.) в их усилиях по созданию высокочувствительных детекторов ГВ. Так, например, основополагающая идея использовать оптический лазерный интерферометр Майкельсона для регистрации ГВ была высказана Герценштейном и Пустовойтом в 1962 г. [9] в работе, которая была стимулирована Гинзбургом.

Инициаторами создания лазерной обсерватории LIGO были американские ученые К.Торн, Р.Вайсс и Р.Дривер. В состав интернационального авторского коллектива (более 1000 ученых из примерно 15 стран) вошли представители Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (группа, возглавлявшаяся В.Б.Брагинским) и Института прикладной физики РАН (под руководством Е.А.Хазанова).

Новый канал информации позволяет наблюдать различные катастрофические явления, происходящие во Вселенной: слияние белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах, взрывы сверхновых звезд. Не исключено, что с его помощью можно будет обнаружить и такие процессы, о которых мы пока не имеем никакого представления (например, явления, связанные с космическими струнами, доменными стенками, белыми дырами, кротовыми норами и т.п.). Дальнейшее повышение чувствительности детекторов и ввод в строй новых приборов (в первую очередь, космического гравитационно-волнового интерферометра LISA) позволит наблюдать также различные фоновые излучения ГВ, в том числе фон очень длинных ГВ ($\lambda > 1$ Мпк), образующихся на переходных стадиях расширения Вселенной, а также излучение от слияния двойных сверхмассивных ЧД в ядрах галактик. Например, сверхдлинные фоновые ГВ могли формироваться в конце инфляционной стадии развития Вселенной, когда возраст последней был $\sim 10^{-36}$ с, в эпоху распада скалярного поля и формирования частиц материи.

С открытием гравитационных волн встает на прочный наблюдательный базис новая наука — геометродинамика [10], которая начала развиваться в начале 1960-х годов в работах Дж.А.Уилера, К.С.Торна, Я.Б.Зельдовича, И.Д.Новикова и других ученых. Геометродинамика — наука, изучающая нелинейную динамику искривленного пространства-времени. Гравитационно-волновая астрономия дает нам уникальную возможность исследовать не только различные материальные тела, такие как звезды, галактики и т.п., но и пустое пространство-время, которое теперь можно рассматривать как один из видов материи и с помощью соответствующих телескопов реально изучать (например, находить параметры кривизны и завихренности).

Но особенно ярко свойства пространства-времени раскрываются при слиянии ЧД в двойных системах. Здесь мы имеем удивительное взаимопроникновение проблем ГВ и ЧД. С одной стороны, открытие ГВ от слияния ЧД реализует принципиально новый канал информации о Вселенной, с другой — ставит проблему исследования ЧД на качественно новый уровень. Раньше при исследованиях ЧД в двойных системах мы могли лишь наблюдать рентгеновский «ореол» вокруг них, который образует горячая плазма, сформированная в результате аккреции вещества спутника — нормальной звезды, и по движению этой звезды определять массы ЧД. Теперь же, благодаря наблюдениям гравитационно-волновых событий, мы можем следить за процессом слияния двух ЧД и образования общего горизонта событий вновь родившейся, более массивной, ЧД, в том числе и изучать различные моды колебаний последней. Это дает принципиальную возможность окончательно доказать экспериментально наличие горизонта событий у ЧД, что необходимо, чтобы присвоить феномену черной дыры «юридический» статус «открыт».

## В поисках «звенящего» горизонта

Напомним, что под ЧД понимается область пространства-времени, для которой гравитационное поле столь сильно, что никакой сигнал, даже свет, не может вырваться на пространственную бесконечность. Характерный размер ЧД задается шварцшильдовским радиусом $r_{sh} = 2GM/c^2$, где $M$ — масса ЧД, $c$ — скорость света в вакууме, $G$ — гравитационная постоянная. Границей ЧД служит горизонт событий, на котором с точки зрения далекого наблюдателя ход времени останавливается. Радиус горизонта событий $r_h$ равен шварцшильдовскому радиусу $r_{sh}$ для невращающейся ЧД и меньше него ($r_h < r_{sh}$) для вращающейся ЧД. В случае вращающейся ЧД горизонт событий погружен внутрь эргосферы, где содержится вихревое гравитационное поле. Для дыры земной массы шварцшильдовский радиус составляет всего 9 мм, для Солнца $r_{sh} = 3$ км, для массы $2 \cdot 10^9 M_\odot$ (такие ЧД наблюдаются в ядрах некоторых галактик) $r_{sh} = 40$ а.е., что равно расстоянию от Солнца до Плутона и соответствует размерам Солнечной системы.

Горизонт событий ЧД — ее главная, специфическая черта. Это не какая-то твердая наблюдаемая поверхность, а так называемая световая поверхность в пространстве-времени. Особенности на горизонте событий могут быть устранены выбором соответствующей системы отсчета. Например, для наблюдателя, свободно падающего на ЧД, особенности на горизонте событий отсутствуют; в этом случае наблюдатель может проникнуть

внутрь ЧД и за конечное время достичь центральной сингулярности, где он будет разорван нарастающими приливными силами. Таким образом, для окончательного доказательства существования ЧД во Вселенной необходимо с помощью наблюдений убедиться в отсутствии у них твердых наблюдаемых поверхностей и в наличии горизонта событий.

Вот уже полвека ученые изучают ЧД в рентгеновских двойных системах, где по движению оптической звезды можно измерять массы компонент. Исследования примерно 30 ЧД и около 80 НЗ в тесных двойных системах уже дали важное косвенное свидетельство отсутствия твердых наблюдаемых поверхностей у кандидатов в ЧД звездных масс. А именно: во всех случаях, когда релятивистский объект демонстрирует явные признаки твердой наблюдаемой поверхности (феномены радио- и рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера 1-го типа, характерные для НЗ), его измеренная масса не превышает $3M_\odot$ — абсолютного верхнего предела массы НЗ, предсказываемого ОТО. В то же время ни один из трех десятков массивных ($M > 3M_\odot$) компактных рентгеновских источников (кандидатов в ЧД) не показывает признаков наблюдаемой поверхности (не является ни радио-, ни рентгеновским пульсаром, ни рентгеновским барстером 1-го типа) в полном согласии с предсказанием ОТО об отсутствии у ЧД наблюдаемых поверхностей. Поскольку общее число релятивистских объектов превышает сотню, можно считать, что статистика в данном случае весьма представительна. Таким образом, НЗ и ЧД различаются не только по массам, но и по наблюдательным проявлениям — в полном соответствии с предсказаниями ОТО.

Тем не менее указанное яркое различие в поведении аккрецирующих ЧД и НЗ не может служить окончательным доказательством отсутствия у ЧД наблюдаемых поверхностей. Дело в том, что и некоторые НЗ могут свои поверхности «прятать». Например, если ось магнитного диполя у быстровращающейся сильно намагниченной НЗ точно совпадает с осью ее вращения, феномен рентгеновского пульсара при аккреции наблюдаться не будет. В этом случае тяжелую ($M > 3M_\odot$) НЗ трудно отличить от ЧД; кроме того, очевидно, что нельзя окончательно судить о природе объекта по отсутствию у него некоторых признаков.

Чтобы доказать существование горизонта событий, необходимо наблюдать эффекты, специфичные для ЧД. Такими эффектами можно считать регистрируемые с помощью ГВ различные моды колебаний вновь образовавшегося горизонта событий при слиянии двух ЧД и характерное затухание этих колебаний после процесса слияния (стадия так называемого послезвона — ring-down). Все эти эффекты в принципе можно наблюдать с помощью современных и будущих гравитационно-волновых телескопов.

Эволюция тесной двойной системы ЧД может быть разделена на три этапа: сближение двух ЧД по спирали, вызванное потерей двойной системой углового момента за счет излучения ГВ, слияние двух ЧД и конечная стадия затухающего «звона» общего горизонта событий вновь образовавшейся более массивной ЧД (рис.1).

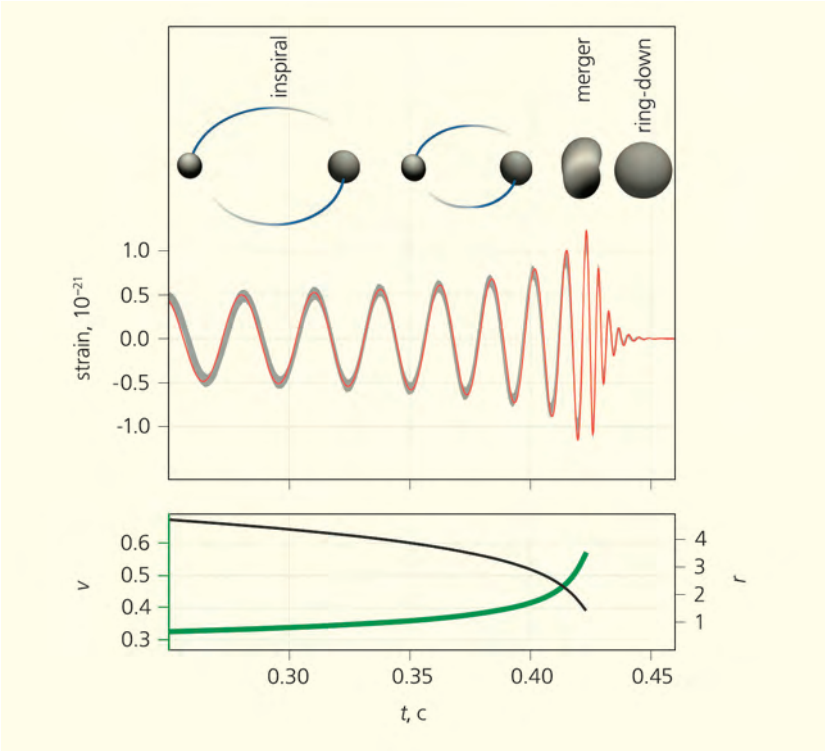



Рис.1. Гравитационно-волновой сигнал от слияния двух черных дыр, включая стадию ring-down (соответствует событию GW150914) [6]. Вверху показаны три стадии: inspiral — спиральное сближение двух черных дыр под влиянием излучения гравитационных волн, merger — процесс слияния двух черных дыр, ring-down — стадия сформированного общего горизонта событий вновь образовавшейся сильно возбужденной черной дыры, которая испытывает квазинормальные моды колебаний, затухающие со временем; strain — относительная деформация метрики пространства-времени, $t$ — время. Внизу приведены зависимости от времени для орбитальной скорости двух сближающихся черных дыр $v$ (в долях скорости света) и для расстояния между центрами двух черных дыр $r$ (в долях шварцшильдовского радиуса $r_{sh} = 2GM/c^2$, где $M$ — суммарная масса двух сливающихся черных дыр).

Стадия спирального сближения двух ЧД может быть описана в постньютоновском приближении, что представляет собой сравнительно простую задачу. Но расчет динамики двух сливающихся ЧД — задача очень сложная, требующая численного моделирования в рамках точных нелинейных уравнений ОТО на суперкомпьютерах. Несмотря на огромные трудности, такой расчет проведен для многих вариантов слияния двух ЧД [10]. На конечной стадии две исходные ЧД образуют одну новую, большую по массе, дыру, находящуюся в очень возбужденном состоянии, причем со временем эти возбуждения затухают. Согласно В.П.Фролову и И.Д.Новикову, они оказываются нелинейной суперпозицией квазинормальных мод колебаний, причем затухание квазинормальных мод создает характерную «звенящую» форму профиля гравитационных волн.

Гравитационно-волновое излучение, испускаемое на стадии слияния двух ЧД и стадии ring-down, несет информацию о сильно нелинейной крупномасштабной динамике кривизны пространства-времени. Поэтому детальное исследование этих гравитационно-волновых сигналов (при достаточно высоком отношении «сигнал/шум») позволит проверить нелинейные уравнения ОТО во всей их сложности.

Вполне возможно, что именно на этом пути удастся получить окончательное доказательство существования горизонта событий у ЧД и тем самым поставить последнюю точку в принципиально важном вопросе о реальном существовании ЧД во Вселенной. Это будет иметь как огромное научное, так и большое философское значение.

## «Паспорта» гравитационно-волновых двойных систем

По аналогии с рентгеновскими двойными системами, открываемыми по рентгеновскому излучению, которое сформировалось при аккреции вещества, тесные двойные системы, обнаруживаемые по гравитационно-волновому излучению, естественно называть гравитационно-волновыми двойными системами.

К настоящему времени обсерваторией LIGO открыты четыре подобных системы (GW150914, GW151226, LVT151012, GW170104), данные о которых собраны в табл.1. Здесь же для сравнения приведены характеристики наиболее массивных рентгеновских двойных систем с ЧД, а также даны параметры некоторых наиболее массивных «классических» тесных двойных систем в нашей Галактике и Большом Магеллановом Облаке (LMC) — ближайшей к нам галактике.

Массы ЧД в ГВ системах определяются по форме гравитационно-волнового сигнала (как говорят, чирпа), который в случае сливающихся ЧД в двойной системе представляет собой квазисинусоидальные колебания с увеличивающейся частотой и возрастающей амплитудой, которые затем резко затухают (упомянутая выше стадия ring-down). На рис.2 показаны гравитационно-волновые сигналы от трех систем: GW150914, GW151226, GW170104 (сигнал от системы LVT151012 получен с меньшей достоверностью, поэтому на рис.2 он не приведен). Форма сигнала определяет так называемую чирп-массу $M_{ch} = (M_1M_2)^{3/5}\,(M_1 + M_2)^{-1/5}$, которая выражается через частоту колебаний сигнала и ее первую производную по времени. Здесь

**Таблица 1**

**Различные двойные системы**

| Система | Типы компонент | Массы ($M_\odot$) | Начальные массы звезд ($M_\odot$) | Орбитальный период (сут) | Темп потери массы ($M_\odot$/год) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Гравитационно-волновые двойные системы с черными дырами, открытые обсерваторией LIGO** | | | | | |
| GW150914 | BH+BH | 36+29 | 100+80 | — | — |
| GW151226 | BH+BH | 14.2+7.5 | 50+30 | — | — |
| LVT151012 | BH+BH | 23+13 | 75+50 | — | — |
| GW170104 | BH+BH | 31.2+19.4 | 80+60 | — | — |
| **Массивные рентгеновские двойные системы с черными дырами** | | | | | |
| Cyg X-1 | O9.7Iab+BH | 19.16+14.81 | — | 5.60 | — |
| LMC X-1 | O(7-9)III+BH | 30.6+10.3 | — | 3.91 | — |
| M33 X-7 | O(7-8)III+BH | 70.0+15.6 | — | 3.45 | — |
| **Классические массивные тесные двойные системы** | | | | | |
| WR20a | WN6h+WN6a | 83+82 | — | 3.69 | $\sim 10^{-5}$ |
| NGC3603-A1 | WN6a+WN6 | 116+89 | — | 3.77 | $\sim 2\cdot 10^{-5}$ |
| R136-38 (LMC) | O3V+O3V | 56+30 | — | 3.39 | $\sim 10^{-6}$ |
| R145 (LMC) | WN6h+O | >116+>48 | — | 158.8 | $\sim 2\cdot 10^{-5}$ |
| WR21a | O3f/WN6a+O4 | >87+>53 | — | 31.67 | $\sim 10^{-5}$ |

Примечание: BH (black hole) — ЧД.

$M_1$ и $M_2$ — массы ЧД в двойной системе до слияния. Детальное сравнение наблюдаемого сигнала с соответствующей теоретической кривой, рассчитанной в рамках ОТО, позволяет раздельно определить массы ЧД, а также найти ряд других важных характеристик системы. Эти характеристики, а также окончательные значения масс ЧД до и после слияния можно найти в табл.2 (все параметры отнесены к системам отсчета, сопутствующим объектам). Отметим, что массы результирующих ЧД после слияния меньше суммы масс двух исходных ЧД из-за того, что часть массы-энергии (~1–3$M_\odot$) излучилась в виде энергии гравитационных волн. Поскольку сам гравитационно-волновой сигнал длится лишь доли секунды, соответствующая пиковая мощность, излученная в виде ГВ, составляет чудовищно большую величину, порядка $(3–4)\cdot10^{56}$ эрг/с. Эта гравитационно-волновая светимость от одного слияния двух ЧД в сотни раз превышает электромагнитную светимость всех звезд Вселенной (!). Во всех трех случаях сигналы пришли к нам с расстояний, лежащих в диапазоне 400–900 Мпк, поэтому при вычислениях параметров систем необходимо учитывать космологические эффекты.

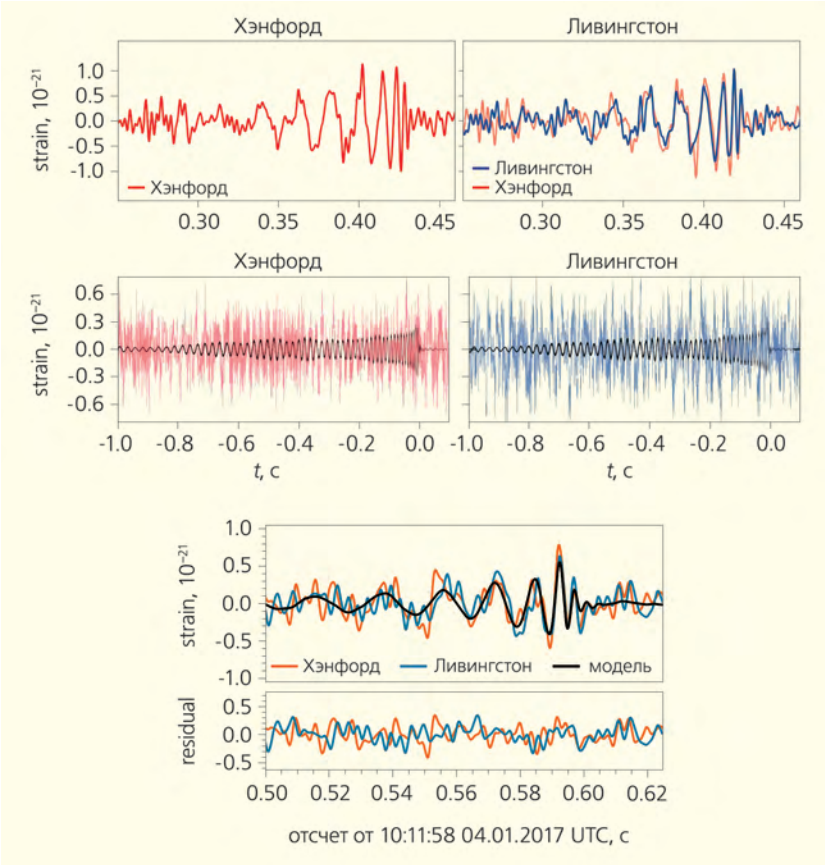



Рис.2. Наблюдаемые на обсерватории LIGO гравитационно-волновые сигналы от трех сливающихся пар черных дыр (сверху вниз): GW150914 ($36M_\odot + 29M_\odot$) [6], GW151226 ($14.2M_\odot + 7.5M_\odot$) [7], GW170104 ($31.2M_\odot + 19.4M_\odot$) [8]. Здесь справа вверху на одном и том же рисунке (для события GW150914) изображены сигналы, зарегистрированные антеннами ГВ в Хэнфорде (красный цвет) и Ливингстоне (синий цвет) с учетом соответствующего времени запаздывания сигналов. Residual — остаточное отклонение, UTC — всемирное время.

В табл.2 приведены также значения безразмерного момента вращения $\alpha_{вр}$ результирующих ЧД после процесса слияния, которые надежно определяются по форме и длительности гравитационно-волнового сигнала, соответствующим стадии ring-down. В случае шварцшильдовской, невращающейся, ЧД $\alpha_{вр} = 0$, в случае керровской ЧД с предельно быстрым вращением $\alpha_{вр} = 1$. Индивидуаль-

**Таблица 2**

**Параметры гравитационно-волновых двойных систем с черными дырами, открытых обсерваторией LIGO (по данным работ [1–3])**

| Параметр | GW150914 | GW151226 | GW170104 |
|---|---|---|---|
| Масса первичной черной дыры, $M_\odot$ | $36^{+5}_{-4}$ | $14.2^{+8.3}_{-3.7}$ | $31.2^{+8.4}_{-6.0}$ |
| Масса вторичной черной дыры, $M_\odot$ | $29^{+4}_{-4}$ | $7.5^{+2.3}_{-2.3}$ | $19.4^{+5.3}_{-5.9}$ |
| Чирп-масса, $M_\odot$ | ~30 | $8.9^{+0.3}_{-0.3}$ | $21.1^{+2.4}_{-2.7}$ |
| Суммарная масса двух черных дыр, $M_\odot$ | ~65 | $21.8^{+5.9}_{-1.7}$ | $50.7^{+5.9}_{-5.0}$ |
| Окончательная масса черной дыры после слияния, $M_\odot$ | $62^{+4}_{-4}$ | $20.8^{+6.1}_{-1.7}$ | $48.7^{+5.7}_{-4.6}$ |
| Излученная энергия в виде гравитационных волн, $M_\odot c^2$ | $3.0^{+0.5}_{-0.5}$ | $1.0^{+0.1}_{-0.2}$ | $2.0^{+0.6}_{-0.7}$ |
| Пиковая гравитационно-волновая светимость, эрг/с | $3.6^{+0.5}_{-0.4}\cdot10^{56}$ | $3.3^{+0.8}_{-1.6}\cdot10^{56}$ | $3.1^{+0.7}_{-1.3}\cdot10^{56}$ |
| Финальный момент вращения черной дыры после слияния | $0.67^{+0.05}_{-0.07}$ | $0.74^{+0.06}_{-0.06}$ | $0.64^{+0.09}_{-0.20}$ |
| Расстояние, оцененное по гравитационно-волновой светимости, Мпк | $410^{+160}_{-180}$ | $440^{+180}_{-190}$ | $880^{+450}_{-390}$ |
| Красное смещение источника гравитационных волн | $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ | $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ | $0.18^{+0.08}_{-0.07}$ |

ные моменты вращения для ЧД до слияния находятся с большой погрешностью. Тем не менее, например, для системы GW151226 ($14.2M_\odot + 7.5M_\odot$) удалось дать оценку момента вращения одной из ЧД системы до слияния, которая превышает 0.2. Моменты вращения ЧД после процесса слияния оказываются меньше единицы и составляют $\alpha_{вр} = 0.74$, 0.67 и 0.64 для систем GW151226 ($14.2M_\odot + 7.5M_\odot$), GW150914 ($36M_\odot + 29M_\odot$) и GW170104 ($31.2M_\odot + 19.4M_\odot$) соответственно. Это означает: ЧД до процесса слияния, скорее всего, вращались медленно и были почти шварцшильдовскими, что накладывает ограничения на механизмы их образования. Дальнейшее повышение точности наблюдений гравитационно-волновых сигналов и накопление числа событий позволят изучать прецессию векторов моментов вращения отдельных ЧД относительно вектора полного момента вращения двойной системы ЧД (так называемую прецессию Лензе—Тирринга). Эта прецессия должна приводить к характерной модуляции огибающей чирпа.

Важно подчеркнуть, что гравитационно-волновые наблюдения позволяют не только измерить массы ЧД, но и определить их диаметры. Например, в момент слияния двух ЧД в событии GW150914 расстояние между ними оказывается близким к величине шварцшильдовского радиуса для ЧД, образующейся после процесса слияния, а орбитальная скорость двух ЧД в этот момент достигает половины скорости света (см. рис.1). Поскольку задача определения параметров системы из двух ЧД из наблюдаемого гравитационно-волнового сигнала переопределена (число искомых параметров значительно меньше числа уравнений, описывающих наблюдаемые точки на кривой сигнала), удается также многократно проверить справедливость уравнений ОТО в сильных гравитационных полях. Во всех случаях пока не обнаружено каких-либо несоответствий между ОТО и наблюдениями.

Кроме того, предполагая, что гравитоны (кванты гравитационного поля) диспергируют в вакууме подобно массивным частицам, из анализа гравитационно-волнового сигнала удается дать ограничения для массы покоя гравитона: $m_g < 7.7 \cdot 10^{-23}$эВ/с$^2$ (или, что то же самое, $m_g c^2 < 7.7 \cdot 10^{-23}$эВ).

## Как черные дыры образуют пары?

Большие массы ЧД в первой открытой гравитационно-волновой системе GW150914 ($36M_\odot + 29M_\odot$), выходящие за пределы интервала масс ЧД в известных рентгеновских двойных системах ($4–16M_\odot$), заставили обсуждать образование тесных двойных ЧД по сценариям, отличным от классических. Так, рассматривался механизм формирования двойных ЧД из первичных ЧД, сформировавшихся на ранних стадиях эволюции Вселенной [11]). Однако последующее открытие обсерваторией LIGO второго гравитационно-волнового всплеска GW151226 ($14M_\odot + 7.5M_\odot$), с «разумными» массами ЧД, показало, что классический сценарий эволюции изолированной массивной тесной двойной системы (ТДС) [11], по-видимому, способен объяснить появление таких систем. Тем не менее остается вопрос: почему мы не наблюдаем очень массивные ЧД в рентгеновских двойных системах? Дело в том, что массы ЧД в рентгеновских двойных системах удается измерить по движению оптических звезд лишь в Млечном Пути и нескольких ближайших к нам галактиках (LMC, SMC, M33 и др.). Оптические звезды в рентгеновских двойных, расположенных в удаленных галактиках, слабы и недоступны для исследования даже самыми крупными современными оптическими телескопами. С другой стороны, ЧД с массами в ~$30–40M_\odot$ образуются из очень массивных звезд, с массами в $100M_\odot$ и более [12] (см. табл.1). Но, согласно функции звездообразования (так называемой функции Солпитера), число звезд с массами более $100M_\odot$ в нашей Галактике очень мало — составляет порядка нескольких десятков, а полное число звезд таких масс от всех ближайших галактик не превышает нескольких сотен. Поэтому формирование очень массивных ЧД ($M = 30–40M_\odot$), доступных измерению в рентгеновских двойных системах, очень маловероятно. Этим и объясняется тот факт, что очень массивные ЧД в рентгеновских двойных системах пока не открыты.

В то же время гравитационно-волновая астрономия оперирует не только с объемом пространства, занятым местной системой галактик, но и с гораздо большим объемом, порядка одного кубического гигапарсека, в котором содержатся многие миллионы галактик. Поэтому обнаружить очень массивные ЧД ($M = 30–40M_\odot$) с помощью таких телескопов вполне реально, что и происходит.

Из формулы для излучения гравитационных волн двойной системой следует, что для формирования наблюдаемого гравитационно-волнового всплеска необходимо, чтобы начальное разделение $A$ между двумя образовавшимися ЧД было не более 40–50 солнечных радиусов. Лишь в этом случае две ЧД успеют слиться за счет потери энергии на излучение ГВ за время, меньшее возраста Вселенной (так называемое хаббловское время ~$13.7 \cdot 10^9$ лет). Для пар ЧД с начальным разделением $A > 40–50R_\odot$ время слияния за счет излучения ГВ больше хаббловского, и гравитационно-волновые всплески от таких пар ЧД не будут наблюдаться.

Но очень массивные звезды Главной последовательности ($M > 100M_\odot$), из которых образуются массивные ЧД, обладают двумя особенностями, которые затрудняют формирование достаточно компактных пар ЧД: они имеют большие радиусы ($R > 20R_\odot$) и обладают весьма мощными звездными ветрами с темпом $\dot{M} \sim 10^{-5}M_\odot$/год (см. табл.1), что приводит к вековому уменьшению их массы

(в случае, если содержание металлов в их веществе близко к солнечному).

Большие начальные радиусы звезд — предшественников массивных ЧД означают, что начальное разделение компонент в соответствующей «классической» тесной двойной системе должно быть весьма велико: $> 50R_\odot$. В то же время радиальная потеря вещества звездами в виде звездного ветра (так называемая джинсовская мода потери вещества) приводит к тому, что разделение между компонентами системы вековым образом возрастает и со временем значительно превосходит критическое значение $50R_\odot$. При этом из-за значительной потери массы водородной оболочки звезды последняя не расширяется в процессе эволюции, не заполняет свою критическую полость Роша*, и в системе не происходит процесс переноса масс от одной компоненты к другой, который мог бы приводить к сокращению разделения $A$ между компонентами.

В итоге в процессе эволюции такой массивной тесной системы (например, $100M_\odot + 80M_\odot$) образуется пара ЧД с большим разделением $A > 50R_\odot$, для которой время слияния двух ЧД больше хаббловского и от которой всплеск ГВ не может наблюдаться.

Темп потери массы звездой примерно пропорционален содержанию металлов (металличности) звездного вещества ввиду того, что истечение в виде звездного ветра контролируется давлением излучения звезды, а металличность обусловливает непрозрачность звездного вещества. Поэтому для формирования компактных двойных ЧД очень подходят звезды с низкой металличностью. В нашей Галактике встречаются звезды с сильно пониженным содержанием атомов металлов; во Вселенной также существуют целые галактики подобного состава. Например, металличность вещества ближайшей к нам LMC вдвое ниже солнечной, а другой близкой к нам галактики — Малого Магелланова Облака почти в 10 раз ниже солнечной. Особенно интересны для гравитационно-волновой астрономии водородно-гелиевые звезды населения III — первичные массивные ($M > 100M_\odot$) звезды, образовавшиеся на ранних стадиях эволюции Вселенной, когда ее возраст был порядка миллиарда лет. Металличность таких звезд близка к нулю, и влияние звездного ветра на их эволюцию незначительно. Если параметры исходной «классической» двойной системы таковы, что соответствующая образовавшаяся пара ЧД имеет разделение, близкое к $50R_\odot$, время слияния ЧД в такой паре очень велико, более 10 млрд лет. Поэтому исходная «классическая» двойная система может быть отнесена к очень ранней стадии эволюции Вселенной, когда ее возраст был порядка миллиарда лет и когда в изобилии существовали массивные водородно-гелиевые звезды III типа населения.

Другая возможность сформировать компактную ($A < 50R_\odot$) пару ЧД состоит в привлечении различных механизмов потери углового момента, что приводит к сокращению разделения между компонентами тесной двойной системы. Например, можно рассматривать эволюцию исходной системы, используя стадию с общей оболочкой, которая при определенных условиях может сформироваться в результате обмена веществом между компонентами и в которой из-за динамического трения может произойти резкое снижение расстояния между компонентами. Можно также использовать идею начального толчка («кика»), возникающего из-за асимметрии взрыва сверхновой звезды, в результате которого сформировалась ЧД. Такой «кик» может способствовать уносу углового момента из системы и сокращению разделения между компонентами. Можно рассматривать эволюцию системы в плотном молекулярном межзвездном облаке, где из-за динамического трения компоненты системы также будут сближаться (идея, недавно высказанная А.В.Тутуковым и А.М.Черепащуком [13]).

К настоящему времени развиты четыре основных эволюционных сценария, позволяющие сформировать компактную ($A < 50R_\odot$) пару ЧД, слияние которых приводит к наблюдаемому всплеску ГВ.

1. Упоминавшийся выше сценарий формирования двойных ЧД из первичных одиночных. В этом сценарии нет ограничений на массы дыр; кроме того, в данном случае ЧД-пары должны слабо вращаться [11].

2. Сценарий динамического формирования массивных тесных двойных систем из иерархических тройных систем звезд — членов плотных ядер скоплений — посредством так называемого механизма Лидова—Козаи. Тройные системы часто формируются в результате тесных сближений звездных пар в плотных ядрах скоплений. В случае тройной системы, если орбита третьей звезды наклонена по отношению к плоскости орбиты внутренней звездной пары на значительный (более 39°) угол, гравитационное взаимодействие между внутренней и внешней орбитами может вызывать высокоамплитудные осцилляции значения эксцентриситета внутренней орбиты (циклы Лидова—Козаи), что способно привести к столкновению и слиянию компонент внутренней пары.

3. Сценарий эволюции химически однородных приливно деформированных массивных звезд в очень тесных, почти контактных, двойных системах.

В таких сильно деформированных и быстро вращающихся массивных звездах происходит меридиональная циркуляция вещества, благодаря которой химические элементы, переработанные в термоядерных реакциях, выносятся из центра звезды на ее поверхность. Звезда быстро стано-

* Под критической полостью Роша во вращающейся двойной системе понимается область в окрестностях звезды, где преобладает ее сила гравитационного притяжения.

вится химически однородной, в основном гелиевой, радиус ее практически не растет в процессе эволюции. Из таких массивных гелиевых звезд могут формироваться весьма массивные ЧД.

4. Классический сценарий эволюции тесных двойных систем с обменом масс между компонентами [12, 14].

В работах нашей группы [15], а также группы К.Бельчинского [16], с использованием программ популяционного синтеза, были рассчитаны классические эволюционные сценарии для массивных тесных двойных систем, приводящие к формированию двойных ЧД и объектов Торна—Житков, когда в конце эволюции ЧД по спирали падает в центр массивной проэволюционировавшей звезды.

Один из сценариев (рис.3), соответствующий рентгеновской двойной системе M33 X-7 (см. табл.1), приводит к формированию объекта Торна—Житков, причем при движении ЧД по спирали внутрь массивной звезды в конце стадии образования объекта может наблюдаться всплеск излучения ГВ [17].

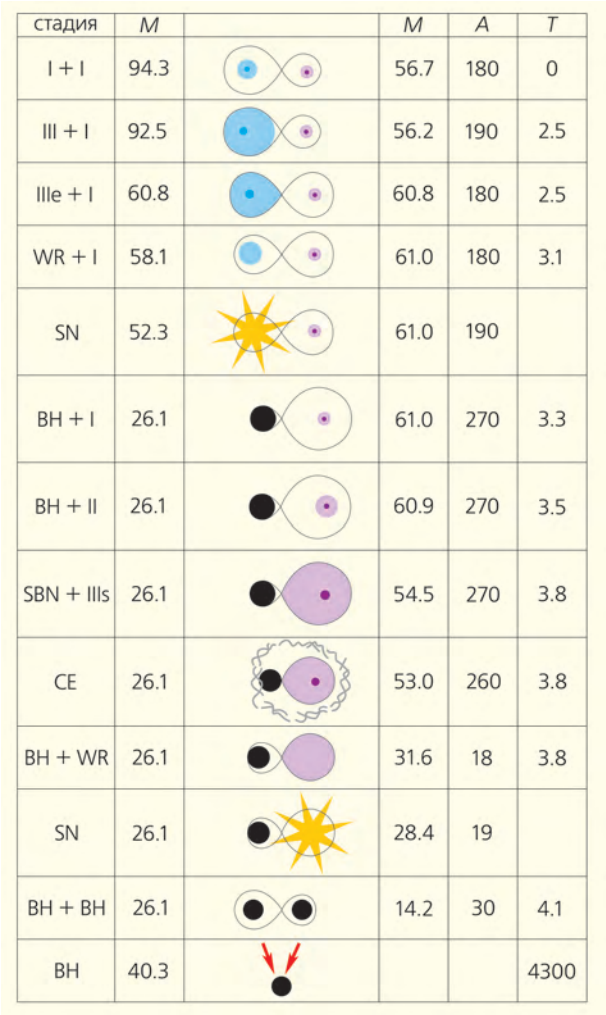
| стадия | $M$ | | $M$ | $A$ | $T$ |
|---|---|---|---|---|---|
| I + I | 113.2 | | 41.4 | 34 | 0 |
| III + I | 108.3 | | 37.8 | 36 | 2.4 |
| WR + I | 75.0 | | 71.1 | 22 | 2.4 |
| SN | 52.5 | | 69.6 | 26 | |
| BH + I | 15.8 | | 69.9 | 46 | 2.6 |
| SBH + IIIs | 15.8 | | 69.3 | 38 | 3.2 |
| CE | 15.8 | | 64.4 | 22 | 3.2 |
| TZ | 55.3 | | | | 3.2 |
| BH | 55.2 | | | | 3.3 |

Рис.3. Последовательность эволюционных стадий для рентгеновской двойной системы с черной дырой M33 X-7, рассчитанная с помощью Машины сценариев и приводящая к формированию объекта Торна—Житков (массивная звезда, в центре которой располагается черная дыра) [15]. Указаны массы компонентов $M$ (в массах Солнца), разделение между компонентами $A$ (в радиусах Солнца) и время $T$, в течение которого двойная система находится на соответствующей стадии эволюции (в миллионах лет). Здесь CE — стадия с общей оболочкой, SN — вспышка сверхновой, SBN — сверхкритическая аккреция на ЧД, TZ — объект Торна—Житков.

Опишем подробнее этот сценарий. В начале эволюции масса первичной звезды системы находится в диапазоне $M_1 = (80–120)M_\odot$, масса вторичной составляет $M_2 = (40–60)M_\odot$, а начальная большая полуось орбиты $A \leq 100R_\odot$. Звездный ветер компонент тесной двойной системы предполагается слабым. Важно подчеркнуть, что массивные «классические» системы с подобными массами реально наблюдаются (см. табл.1). После выгорания водорода в ядре первичная, более массивная звезда расширяется и заполняет свою полость Роша. Начинается перетекание вещества на соседнюю звезду, как правило, с темпом более быстрым, чем в ядерной шкале времени эволюции (при перетекании вещества от более массивной к менее массивной звезде разделение между компонентами убывает, что дополнительно стимулирует обмен масс). После потери водородной оболочки первой звезды на ее месте остается звезда Вольфа—Райе (WR) — «обнаженное» гелиевое ядро первичной звезды с небольшой водородной оболочкой. Звезда WR, взрываясь, как сверхновая типа Ib/c, образует ЧД. Наличие лишь слабого звездного ветра, а также предположение, что около половины массы звезды WR коллапсирует в ЧД, позволяют объяснить формирование ЧД требуемой массы $(15–20)M_\odot$ в достаточно тесной системе. Существенно то, что ввиду большого начального отношения масс компонент, $q = M_2/M_1 = 0.35$, общая оболочка на стадии первичного обмена масс не образуется и система эволюционирует как полуразделенная.

Вторая звезда системы, нарастившая массу в процессе первичного обмена, заполняет свою полость Роша, вследствие чего начинается сверхкритическая аккреция на ЧД, затем происходит образование общей оболочки, и двойная система заканчивает свое существование в результате падения по спирали ЧД в центр оптической звезды с образованием объекта Торна—Житков. Конечным результатом эволюции такой системы (с относительно малым начальным разделением компонент $A \leq 100R_\odot$) оказывается одиночная массивная ЧД. Во время движения ЧД по спирали внутрь звезды (стадия образования объекта Торна—Житков) система, как уже упоминалось, может быть мощным источником излучения ГВ [16].

На рис.4 представлен эволюционный сценарий, приводящий к образованию компактной ($A \leq 50R_\odot$) двойной системы ЧД. В данном случае, благодаря выбору большого начального разделения компонент $A = (170–200)R_\odot$, общая оболочка во время вторичного обмена масс рассеивается во внешнее пространство из-за передачи значительной части орбитального углового момента и энергии системы в оболочку, и объект Торна—Житков не успевает образоваться. Формируется тесная пара «ЧД + звезда WR». Затем звезда WR,



| стадия | M | | M | A | T |
|---|---|---|---|---|---|
| I + I | 94.3 | | 56.7 | 180 | 0 |
| III + I | 92.5 | | 56.2 | 190 | 2.5 |
| IIIe + I | 60.8 | | 60.8 | 180 | 2.5 |
| WR + I | 58.1 | | 61.0 | 180 | 3.1 |
| SN | 52.3 | | 61.0 | 190 | |
| BH + I | 26.1 | | 61.0 | 270 | 3.3 |
| BH + II | 26.1 | | 60.9 | 270 | 3.5 |
| SBN + IIIs | 26.1 | | 54.5 | 270 | 3.8 |
| CE | 26.1 | | 53.0 | 260 | 3.8 |
| BH + WR | 26.1 | | 31.6 | 18 | 3.8 |
| SN | 26.1 | | 28.4 | 19 | |
| BH + BH | 26.1 | | 14.2 | 30 | 4.1 |
| BH | 40.3 | | | | 4300 |

Рис.4. Последовательность эволюционных стадий для рентгеновской двойной системы IC10X-1, рассчитанная с помощью Машины сценариев и приводящая к формированию компактной ($A = 30R_\odot$) двойной системы из черных дыр [15]. В течение 4.3 млрд лет две черные дыры сливаются и формируют мощный гравитационно-волновой всплеск. Обозначения те же, что на рис.3.

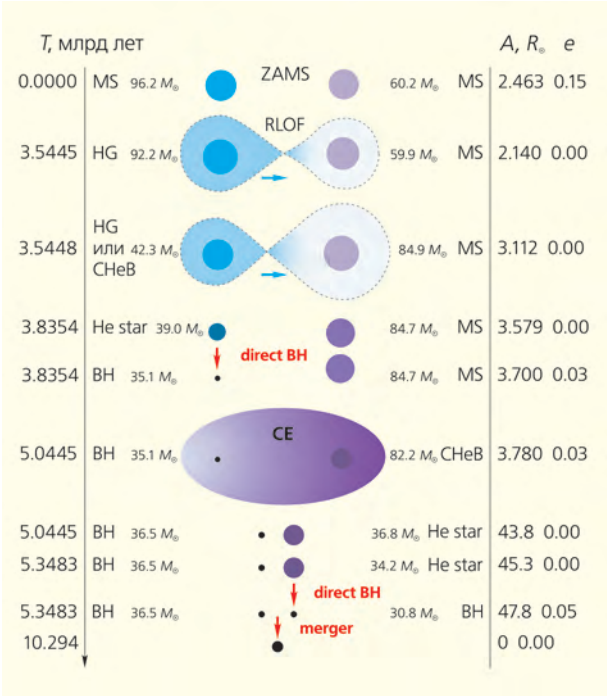



Рис.5. Последовательность эволюционных стадий массивной двойной системы, состоящей из звезд населения III с низкой металличностью [16]. Формируется компактная ($A = 47.8R_\odot$) система из двух черных дыр с массами, соответствующими событию GW150914 ($36M_\odot + 29M_\odot$), которые за время 10.294 млрд лет сливаются и порождают мощный гравитационно-волновой всплеск, подобный GW150914. Здесь MS (Main Sequence) — стадия главной последовательности; ZAMS (Zero Age Main Sequence) — начало стадии главной последовательности; RLOF (Roche Lobe Over Flow) — переполнение полости Роша; He Star — гелиевая звезда; CHeB (Core Helium Burning) — горение гелия в ядре звезды; merger — результат слияния; $e$ — эксцентриситет.

взрываясь, как сверхновая типа Ib/c, формирует вторую ЧД, и образуется компактная пара из двух ЧД с разделением $A = 30R_\odot$. Далее в течение 4.3 млрд лет эти две ЧД сближаются из-за потери энергии системой в виде гравитационных волн и в конце такого спирального сближения формируется мощный всплеск ГВ. В итоге, после слияния двух ЧД, образуется одиночная массивная ЧД. В данном случае также предполагается, что исходные звезды «классической» тесной двойной системы имеют слабый звездный ветер, а при коллапсе около 50% массы звезды WR попадает под горизонт событий ЧД.

На рис.5 приведен эволюционный сценарий массивной тесной двойной системы, приводящий к формированию пары массивных ЧД со значительным разделением $A = 47.8R_\odot$ [16]. Время слияния двух ЧД в данном случае весьма велико (10.294 млрд лет). Это дает возможность отнести соответствующую исходную «классическую» систему к очень ранней эпохе расширения Вселенной, когда ее возраст был всего около 2 млрд лет и когда существовало много массивных водородно-гелиевых звезд III типа населения с низкой металличностью (~3% от солнечной). В таком случае предположение о слабости звездных ветров компонент исходной системы кажется естественным. При этом начальные массы исходных компонент составляют $M_1 = 96.2M_\odot$ и $M_2 = 60.2M_\odot$, а начальное разделение выбирается весьма большим: $A = 2463R_\odot$.

Вычисления группы Бельчинского [16] для случая классического эволюционного сценария изолированных массивных двойных систем предсказывают, что продвинутые наземные гравитационно-волновые обсерватории второго поколения, достигшие предельной чувствительности, долж-

ны регистрировать около 1000 слияний пар черных дыр в год, причем их суммарные массы лежат в пределах (20–80)$M_\odot$.

Для других сценариев эволюции, упомянутых выше, частоты регистрации всплесков ГВ от слияния ЧД в двойных системах ожидаются того же порядка или меньше.

На основе первых 16 дней наблюдений команда LIGO оценила частоту слияния двойных ЧД в (9–240) Гпк$^{-3}$ год$^{-1}$ [6–8], что в целом согласуется с теоретическими предсказаниями.

Недавно поступило сообщение о том, что окончательно вступила в строй итальянская гравитационно-волновая обсерватория VIRGO. С 16 июня сего года начались регулярные наблюдения ГВ на этой обсерватории. Совместная регистрация сигналов ГВ на обсерваториях LIGO и VIRGO позволит увеличить надежность результатов наблюдений и уменьшить размеры возможных областей локализации обнаруженных событий на небесной сфере, что открывает новые перспективы как для гравитационно-волновой астрономии, так и для астрономии электромагнитного диапазона. Ученые всего мира с нетерпением ждут новых сенсационных открытий в области гравитационно-волновых исследований Вселенной.

## Родословная темной энергии

В дополнение к первоначальному Списку Гинзбурга, в вариантах 1995–2004 гг. [18–20], появляется ряд новых тем и задач космологии: модель расширяющейся Вселенной Фридмана, инфляция, космологическая постоянная Лямбда, ее трактовка по Глинеру как характеристики вакуумоподобной среды, квинтэссенция, связь между космологией и физикой высоких энергий. Этот набор тем концентрируется в основном вокруг проблемы темной энергии — одной из самых острых проблем фундаментальной физики и астрономии наших дней.

История темной энергии начиналась 100 лет назад, в 1917 г., со статьи Эйнштейна «Вопросы космологии и общая теория относительности», вышедшей в «Сообщениях Прусской академии наук» в Берлине. Согласно интерпретации, предложенной позднее (в 1965 г.) Э.Б.Глинером (тогда сотрудником Ленинградского физико-технического института) и ставшей сейчас (почти) общепринятой, темная энергия — это особого рода космическая сплошная среда, которая равномерно заполняет весь объем Вселенной и создает в ней всеобщее отталкивание — всемирное антитяготение. Темная энергия не меняется со временем, и ее единственной независимой физической характеристикой служит эйнштейновская космологическая постоянная, обозначаемая греческой буквой $\Lambda$ (лямбда). Как всякая макроскопическая среда, темная энергия обладает плотностью и давлением. Ее плотность положительна, а давление отрицательно и равно плотности (умноженной на скорость света в квадрате) по абсолютной величине. Согласно ОТО, тяготение определяется не только плотностью среды (как в механике Ньютона), но и ее давлением. Отрицательное давление темной энергии создает отрицательное тяготение, т.е. антитяготение. По своим механическим свойствам темная энергия подобна вакууму: она сопутствует любому движению. Если, например, имеются два тела, движущиеся относительно друг друга, то темная энергия сопутствует каждому из них. По этой причине космический вакуум не может служить системой отсчета.

Таких слов, как «темная энергия», «космическая среда», «вакуум» или «всемирное антитяготение», в работе Эйнштейна нет; в ней говорится (на первый взгляд, несколько формально) о постоянной величине, добавленной им в первоначальный (1915-го года) вариант уравнений ОТО. Дело, конечно, не в словах и названиях; важнее и поучительнее другое: в работе 1917 года и в дальнейших работах Эйнштейна нет ни слова о физической природе космологической постоянной. Эйнштейн открыл всемирное антитяготение, но не стал измышлять гипотез на этот счет — как задолго до того поступил Ньютон, когда открыл всемирное тяготение.

Сейчас, через 330 лет после ньютоновских «Начал» и через 100 лет после эйнштейновской ОТО, мы так и не знаем на самом деле, что такое по сути всемирное тяготение-антитяготение. Современная фундаментальная физика полей и частиц не дает ответа на этот вопрос; в ней не было ранее и нет до сих пор никаких указаний на существование темной энергии. Добавим, что в фундаментальной физике отсутствует и представление о столь же загадочной по своей природе темной материи, к открытию которой астрономы шли 40 лет (1933–1972). Как теперь известно, на темную энергию приходится 70%, а на темную материю — 26% полной массы/энергии наблюдаемой Вселенной. На «обычное» вещество и космическое электромагнитное излучение, т.е. на то, с чем успешно справляется сегодняшняя физика полей и частиц, остается в космологии не более 4%. Как надеялся Гинзбург, «физике предстоит в будущем сделать гораздо больше, чем то, что уже сделано ею до сих пор».

В работе 1917 г. Эйнштейн предпринял первую в истории науки попытку сделать предметом точного физико-математического описания и изучения всю Вселенную, понимаемую как некое единое целое. Столь неординарная задача требовала новой физической идеи, соразмерной этой задаче по оригинальности и теоретической мощи. Такой идеей стало эйнштейновское антитяготение. Роль и место этой идеи в физике и астрономии демонстрируется у Эйнштейна на примере его космологической модели — первой в современной науке теоретической конструкции такого рода. Это был простейший пример того, как антитяготение —

эта изобретенная им могучая новая сила — могла бы действовать в мире как целом наряду с всемирным тяготением и конкурировать с ним.

В модели Эйнштейна Вселенная обладает максимальной пространственно-временной симметрией: она статична (т.е. одна и та же в каждый момент времени), а ее пространство однородно (одинаково во всех точках) и изотропно (одинаково во всех направлениях). Статичность обеспечивается точным балансом тяготения и антитяготения: сумма этих двух сил (говоря языком ньютоновской механики) равна нулю в каждой точке пространства во все моменты времени. Такая модель Вселенной не противоречила никаким астрономическим данным тех лет. В астрономии первых двух десятилетий XX века считалось, что Вселенная — это мир неподвижных звезд, и Эйнштейн в своей статье не раз ссылается на эту статическую картину мира.

Следующий шаг в теоретической космологии был сделан петербургским математиком А.А.Фридманом. Отказавшись от идеи статичности и неизменности мира, Фридман построил в 1922–1924 гг. модель эволюционирующей Вселенной. Она, как и модель Эйнштейна, основана на ОТО и предполагает однородность и изотропию пространства. Сходство моделей еще и в том, что Фридман не отбросил космологическую постоянную, сохранив тем самым в своей теории динамический фактор всемирного антитяготения. В модели Фридмана нет статичности. В ней допускается как расширение, так и сжатие мира как целого. Предпочтение явно отдавалось картине расширения, и Фридман даже оценил — правильно по порядку величины (!) — современный возраст Вселенной, т.е. время, протекшее от начала космологического расширения. С учетом космологической постоянной это «по порядку величины десятки миллиардов наших обычных земных лет». Таков стиль Петербургской математической школы: считать до числа.

Позднее, в 1920-е годы, резко изменилась астрономическая картина мира. Трудами астрономов-наблюдателей В.Слайфера, М.Хьюмассона, Э.Хаббла (все из США) и Э.Эпика (тогда свежего выпускника Московского университета) было установлено, что Вселенная — не мир звезд, а мир галактик, гигантских звездных систем, которые служат основными элементами структуры Вселенной. Оказалось также, что галактики не стоят на месте, а движутся, разбегаясь от нас в разные стороны. В 1927 г. Ж.Лемэтр, бельгийский теоретик (и аббат), собрал опубликованные к тому времени наблюдательные данные о расстояниях и скоростях галактик и обнаружил, что разбегание галактик следует простому закону: в каждый момент времени скорость удаления любой галактики прямо пропорциональна расстоянию до нее. Эту зависимость, правда, традиционно называют законом Хаббла (тот переоткрыл ее в 1929 г.).

Нередко говорят, что космологию Фридмана подтвердил в 1929 г. Хаббл в своих наблюдениях разбегающихся галактик. В действительности наблюдения Хаббла ограничивались ближним объемом мира — расстояния у него не превосходили 20–30 Мпк. Сам он ошибочно считал, что его предел дальности не больше 2–3 Мпк, и полагал, что это и есть вся Вселенная целиком. До наблюдений в глобальных, истинно космологических масштабах порядка тысяч мегапарсеков было тогда еще далеко. Модель Фридмана с эйнштейновским антитяготением долго ждала эмпирической проверки и нашла надежное подтверждение лишь в 1998–1999 гг. в наблюдениях на космическом телескопе «Хаббл» (Hubble Space Telescope — HST). В действительности не человек Хаббл, а телескоп «Хаббл» подтвердил теорию Фридмана.

## Антитяготение на вселенских просторах

Планомерные космологические наблюдения на космическом телескопе «Хаббл» велись с середины 1990-х годов двумя международными группами астрономов-наблюдателей, одной из которых руководили Б.Шмидт и А.Рийс [3], а другой — С.Перлматтер [4] (в 2011 г. эти три астронома получили Нобелевскую премию по физике). Их наблюдения показали, что у края видимой Вселенной на масштабах порядка тысяч мегапарсеков и более пространственное распределение галактик выглядит статистически однородным, равномерным в среднем. Крупномасштабная однородность — важнейшее свойство наблюдаемой Вселенной как целого. Оно означает, что, подсчитав число галактик в некоторой области с поперечником, скажем, в 3 тыс. Мпк, мы можем ожидать, что практически столько же галактик найдется в любом другом объеме того же размера. Такого рода пространственная симметрия предполагалась — по сути дела, она предсказывалась — в космологических теориях Эйнштейна и Фридмана (см. выше). Открытие глобальной однородности мира в работах [3, 4] было воспринято в астрономии и физике как нечто само собой разумеющееся — другого, собственно, и не ждали.

Столь же ожидаемым было и открытие в работах [3, 4] глобального космологического расширения, предсказанного в теории Фридмана: галактики и их системы действительно разбегаются, удаляясь друг от друга. Из теории Фридмана вытекает, что скорости далеких галактик пропорциональны расстояниям до них (закон Хаббла). Наблюдения [3, 4] подтвердили эту зависимость на самых далеких расстояниях.

Но никто не ожидал (считая и их авторов [3, 4]), что эти наблюдения приведут к открытию темной энергии. В наблюдениях на HST удалось измерить не только скорости удаляющихся галактик и расстояния до них, как это прежде делалось на меньших расстояниях, но — впервые — еще и ускорение, которое испытывают при этом галактики. Оказалось, что ускорение направлено в ту же сто-

рону, что и скорости убегающих галактик, так что галактики удаляются от нас и друг от друга все быстрее и быстрее. Их расталкивает темная энергия с ее эйнштейновским антитяготением.

В наблюдениях [3, 4] удалось измерить плотность темной энергии: $\rho_\Lambda = 0.7 \cdot 10^{-29}$ г·см$^{-3}$. Эта величина ничтожно мала по нашим земным меркам — она на целых 29 порядков меньше, например, плотности воды при «нормальных условиях»; и тем не менее темная энергия почти безраздельно управляет динамикой всей Вселенной как целого. Из примерно 14 млрд лет известной сейчас истории Вселенной (сравним с приближенной оценкой Фридмана — см. выше) на протяжении первых 7 млрд в ней доминировало тяготение, а затем эта роль перешла к антитяготению, которое преобладает в современную эпоху и будет сильнее тяготения также и в сколь угодно отдаленном будущем, насколько об этом можно сейчас судить.

Известно, что во времена Эйнштейна идея космологической постоянной не находила большого признания. Корифеи науки XX в. — В.Паули, Э.Хаббл, Л.Д.Ландау — были резко против нее. Как вспоминал Гинзбург, «Дау и слышать не хотел о космологической постоянной». В XXI в. идея Эйнштейна обрела новую жизнь. Она заняла свое место в одном ряду с самыми значительными достижениями науки, легла в основу основ космологии наших дней. Как некогда было сказано, камень, который поначалу отбросили строители, стал теперь во главу угла.

## Конкуренция сил по соседству

Открытие темной энергии в глобальном космологическом масштабе позволило по-новому взглянуть на мир галактик в относительно малых масштабах. Действительно, если темная энергия описывается космологической постоянной, то она должна присутствовать всюду в мире и везде иметь одну и ту же плотность. Можно ли это проверить в наблюдениях? В глобальном масштабе такая проверка удалась благодаря тому, что антитяготение, создаваемое темной энергией, сильнее тяготения других форм космической энергии/массы у дальней границы Вселенной. Возможно ли подобное доминирование антитяготения где-либо в ближней Вселенной? В 2000–2001 гг. был дан положительный ответ на этот вопрос: на расстояниях 1–10 Мпк от Млечного Пути существуют области пространства, где антитяготение сильнее тяготения [5]. Как и в глобальном масштабе, «измерительным прибором» для темной энергии в малых масштабах послужили потоки галактик.

Локальная Вселенная устроена не по Фридману: никакой однородности в ней нет, и населяющие ее галактики распределены по ближнему объему крайне неравномерно. Подавляющее их число собрано в массивные сгущения, называемые группами (с размерами порядка 1 Мпк) и скоплениями (с размерами порядка 10 Мпк), тогда как в пространстве между сгущениями галактик очень мало. Локальная Вселенная — замечательный объект астрономии и астрофизики, допускающий высокоточные измерения в мире галактик и их систем. Она стала сейчас еще и естественной космической лабораторией для изучения темной энергии.

По понятным причинам особенно интересны самые близкие структуры в нашем галактическом окружении. Наш Млечный Путь вместе с другой столь же крупной туманностью Андромеды образует Местную группу галактик, в состав которой входит еще пять десятков меньших по массе и размерам галактик. Местная группа — гравитационно-связанная квазистационарная система с полной массой $M = (2–3) \cdot 10^{12} M_\odot$. Эту массу составляют вещество звезд и межзвездной среды (барионное), а также темная материя, которой раз в пять больше по массе и которая находится в основном в протяженных гало двух гигантских галактик группы. Размер группы — примерно 2 Мпк в поперечнике. Вне группы на расстояниях от 1.3 до 3 Мпк от ее центра наблюдаются 24 карликовые галактики; все они — без исключения — движутся прочь от группы, причем их скорости тем больше, чем больше расстояние до них. Это ближайший к нам поток разбегания галактик. Такова эмпирическая картина ближней Вселенной по данным И.Д.Караченцева и его сотрудников [21–24], полученным в наблюдениях на HST, 6-метровом БТА (Большом Телескопе Азимутальном САО) и других крупных инструментах (рис.6).

Местную группу с потоком разбегания вокруг нее будем называть далее Местной системой группа—поток. Ее основные черты описываются теоретической моделью, учитывающей (впервые) локальные динамические эффекты темной энергии [5, 25–27]. В этой модели группа представлена сферической массой $M$, а поток разбегания рассматривается как совокупность легких («пробных») частиц, движущихся по радиальным траекториям. (Полная масса карликов реального потока действительно мала — не больше нескольких процентов от массы группы.) Группа вместе с потоком погружена в общий космический фон темной энергии с однородной постоянной плотностью $\rho_\Lambda$.

На каждую из частиц потока действуют две силы: ньютоновская сила притяжения к массе $M$ и эйнштейновская сила отталкивания, создаваемая темной энергией. Первая из сил следует ньютоновскому закону обратных квадратов; она имеет отрицательный знак и убывает (по модулю) с ростом расстояния от центра группы. Вторая сила, напротив, имеет положительный знак и растет с расстоянием по линейному закону — так силу антитяготения описывает ОТО в приближении слабого поля, когда квадрат скорости тел и перепады гравитационного потенциала гораздо меньше (по модулю) квадрата скорости света. Послед-

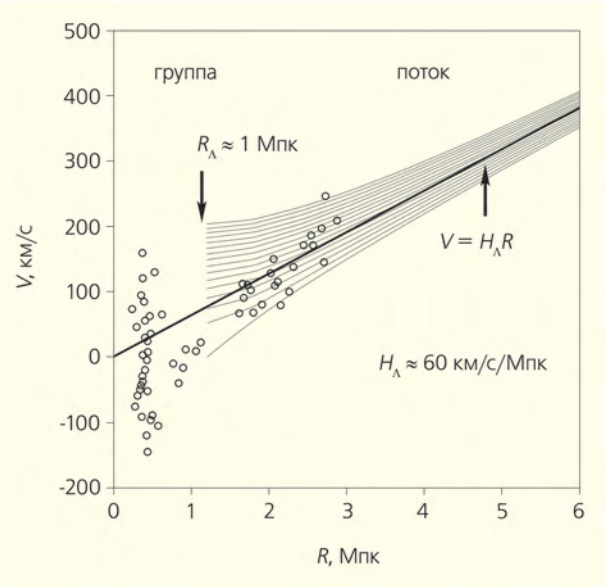



Рис.6. Местная система группа—поток: диаграмма зависимости скорости от расстояния по данным HST [21–23]. Представлены галактики с их радиальными скоростями *V* и радиальными расстояниями *R*, измеренными в системе центра Местной группы. На плоскости скорость—расстояние изображающие точки заполняют две четко различающиеся области. Первую из них, отвечающую расстояниям до 1–1.3 Мпк, занимают галактики группы. В этой области скорости имеют как положительные, так и отрицательные значения в интервале от –150 до +170 км/с. Суммарная скорость всех галактик близка здесь к нулю. Средняя линейная дисперсия (разброс) радиальных скоростей галактик группы составляет 72 км/с. Другую область диаграммы на расстояниях от 1.4 до 3 Мпк занимает местный поток разбегания галактик. В области потока нет отрицательных (направленных к нам) скоростей; все галактики потока удаляются от группы. Их скорости имеют значения от 60 км/с вблизи расстояния 1.5 Мпк до 250 км/с на расстоянии в 3 Мпк. Местный поток следует линейной зависимости скорости от расстояния (закон Хаббла). Эта зависимость показана прямой линией, лучом, выходящим из начала координат. Луч делит совокупность изображающих точек потока на две равные по числу части, расположенные выше и ниже его. Таким путем находится значение локальной величины $H_\Lambda \approx 60$ км/с/Мпк. Она не слишком сильно отличается от космологической постоянной Хаббла (70 км/с/Мпк), определенной по наблюдениям на глобальных расстояниях. Дисперсия скоростей вокруг прямой составляет 25 км/с, что почти в три раза ниже, чем дисперсия скоростей в группе. Это определенно указывает на весьма высокую степень упорядоченности в кинематической структуре потока как целого. Согласно принятой теоретической модели системы группа—поток, регулярность возникает в потоке благодаря темной энергии, которая доминирует в его динамике. Эффект иллюстрируется на рис.6 набором теоретических фазовых траекторий (т.е. кривых скорость—расстояние для частиц потока), которые сходятся с ростом расстояния к лучу, представляющему закон Хаббла.

нее условие выполняется для локальной системы группа—поток с хорошим запасом.

Так как силы имеют разные знаки и по-разному ведут себя с расстоянием, существует такая дистанция, на которой их сумма обращается в нуль. Это критическое расстояние выражается через массу группы $M$ и плотность темной энергии $\rho_\Lambda$: $R_\Lambda = [3M/(8\pi\rho_\Lambda)]^{1/3} \approx 1\cdot(M_{12})^{1/3}$ Мпк. Здесь $M_{12}$ — масса группы в единицах $10^{12}M_\odot$. Величина $R_\Lambda$ называется радиусом нулевого тяготения: при $R = R_\Lambda$ имеет место баланс тяготения и антитяготения. На меньших расстояниях, $R < R_\Lambda$, преобладает тяготение, а на бо́льших, при $R > R_\Lambda$, доминирует антитяготение. При указанных выше значениях массы группы $M$ и плотности темной энергии $\rho_\Lambda$ радиус $R_\Lambda$ составляет 1.3–1.4 Мпк. Как мы видим, он весьма близок к известному из наблюдений радиальному размеру Местной группы ≈1 Мпк. Это означает, что в объеме группы тяготение сильнее антитяготения. Такие системы (но без каких-либо признаков антитяготения) были известны в астрономии и ранее.

Что же касается потока разбегания, то он находится на расстояниях $R > R_\Lambda$, т.е. там, где доминирует эйнштейновское антитяготение. Сила антитяготения заставляет частицы потока двигаться с ускорением. Такого рода физических условий в мире галактик (да и вообще в локальной физике и астрономии) прежде не знали. Ускоряющийся поток разбегания галактик вокруг Местной группы представляет собой ближайший к нам пример локальной астрономической структуры нового, неизвестного ранее типа, построенной по законам ОТО.

Теория в комбинации с наблюдениями позволяет сделать ряд заключений относительно как самой системы группа—поток, так и темной энергии, в которую эта система погружена. Один из результатов такого рода — независимая эмпирическая оценка локальной плотности темной энергии. Примем на основании имеющихся наблюдательных данных (см. выше), что радиус нулевого тяготения $R_\Lambda$ приближенно равен радиусу группы $R_G$. Локальная плотность темной энергии, обозначаемая в этом случае как $\rho_{loc}$, считается неизвестной величиной. Тогда из формулы для радиуса нулевого тяготения находим: $\rho_{loc} \approx 3M/(8\pi)\, M/R_G^3$.

Подставляя сюда наблюдаемые значения для $M$ и $R_G$, получаем плотность $\rho_{loc}$, которая совпадает — по крайней мере по порядку величины — с глобальной плотностью $\rho_\Lambda$, измеренной на космологических расстояниях. Таким образом, из комбинации двух локальных величин $M$ и $R_G$, допускающих прямое наблюдательное измерение на весьма скромных астрономических расстояниях, возникает третья величина — фундаментальная константа, имеющая универсальный физический смысл.

Модель группа—поток позволяет проследить сложную нелинейную механику ускоряющихся потоков. Как оказывается, антитяготение, доминирующее в локальном потоке, не только ускоряет раз-

бегание галактик по радиальным направлениям, но вместе с тем еще и придает потоку регулярную «хаббловскую» кинематику с линейной зависимостью скорости от расстояния. По этой причине локальный поток выглядит как космологическое расширение в миниатюре.

Такого рода близкое подобие локального потока и глобального расширения представлялось до недавнего времени «загадочным», как не раз писал об этом А.Сэндидж (США), классик внегалактической астрономии. «Удивительным» находил этот факт и Я.Б.Зельдович. Действительно, регулярность разбегания требует, казалось бы, регулярности — т.е. фактически однородности — в пространственном распределении галактик. Так оно и есть в глобальном космологическом масштабе. Но вокруг нас, в локальных масштабах, никакой однородности в распределении галактик определенно нет. Эффект эйнштейновского антитяготения с его универсальным характером снимает эту загадку: все дело в темной энергии, в которую погружены оба потока — глобальный космологический поток, где действует модель Фридмана, и локальный поток, где применима локальная модель, описанная выше. В обоих случаях имеет место доминирование темной энергии как решающий динамический фактор.

Локальная модель получила дальнейшее подтверждение в наблюдениях галактик на расстояниях до 10–11 Мпк, выполненных Караченцевым и его коллегами [21–24] с помощью HST. Примечательно, что этот крупнейший космический инструмент нацелен не только на рекордно далекие космологические расстояния, но также и на сравнительно скромные пространственные масштабы в мире галактик. За более чем 300 периодов обращения космического телескопа были открыты и изучены три с лишним сотни близких галактик, по большей части собранных в 12 систем типа группа—поток, сходных с Местной системой [23–25]. Подобную динамическую структуру имеют, как было найдено, также и две близкие системы скопление-поток — скопления Вирго и Форнакс с потоками разбегания вокруг них [28, 29]. Каждая из этих двух систем по размеру примерно в 10 раз больше Местной системы. Их структура повторяет в главных чертах внутреннее устройство последней — но с увеличением всех размеров и длин (включая и потоки) в те же 10 раз. Теория предсказывает существование структуры с потоком разбегания также и вокруг крупнейшего скопления Кома, находящегося на относительно далеком (~100 Мпк) от нас расстоянии [29].

Упомянутые 12 объектов образуют вместе с Местной системой коллективную структуру поперечником в 20 Мпк и полной массой (темной материи и барионов) около $10^{14} M_{\odot}$. Все объекты этой структуры располагаются в уплощенном объеме, прилегающем к Сверхгалактической плоскости. По предложению Караченцева структура получила название «Локальный блин Зельдовича» (ЛБЗ, рис.7). 12 объектов ЛБЗ удаляются от центра Местной группы со скоростями от 100 до 1000 км/с, близко следуя при этом линейной (хаббловской) зависимости скорости от расстояния.

ЛБЗ — это локальный поток разбегания, который заметно отличается по своему устройству от системы группа—поток. Для его описания требуется такая модель, в которой все 13 объектов ЛБЗ взаимодействуют между собой и с темной энергией [30]. Такая модель предполагает решение задачи $N$ тел (здесь $N = 13$), погруженных в общий фон темной энергии. «Начальные условия» задачи задаются известными по наблюдениям радиальными скоростями объектов и расстояниями между ними. Численное решение задачи позволяет найти ускорение для каждого из тел. Оказывается, что в современную эпоху все тела ЛБЗ имеют положительное ускорение. Это означает, что в объеме ЛБЗ доминирует эйнштейновское антитяготение, создаваемое темной энергией. По этой причине скорости удаления разбегающихся тел возраста-

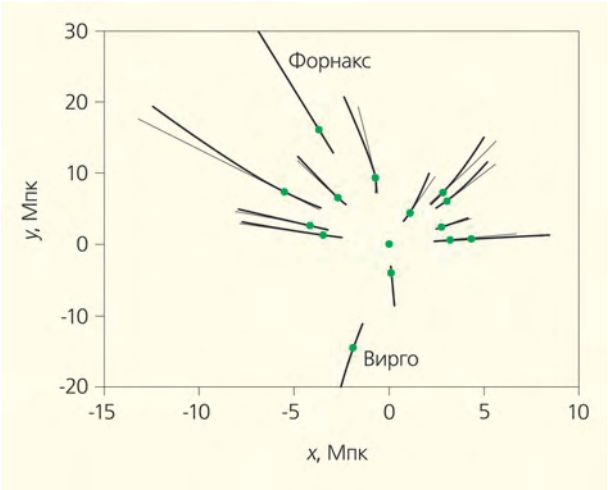



Рис.7. Локальный блин Зельдовича: пространственные траектории в модели $N$-тел, погруженных в темную энергию. Блины в теории Зельдовича — уплощенные системы галактик, которые вместе со скоплениями и филаментами образуют крупномасштабную структуру Вселенной. В ближней Вселенной такого рода уплощение в пространственном распределении галактик известно как супергалактическая плоскость. ЛБЗ располагается в районе этой плоскости и занимает объем с размером в 20 Мпк. Массы тел, их расстояния и радиальные скорости найдены по наблюдениям на HST [23–24]. Все тела удаляются от Местной группы со скоростями, близко соответствующими линейной зависимости от расстояний. Кружками на рисунке отмечены современные положения тел. Толстые линии — траектории 12 тел с учетом влияния двух ближайших скоплений галактик Вирго и Форнакс. Тонкие линии — траектории без учета скоплений; различие вариантов не очень велико. Модель показывает, что в обоих случаях движение тел происходит с ускорением, направленным вдоль скорости. Это означает, что в динамике системы доминирует антитяготение, создаваемое темной энергией.

ют со временем сейчас и будут еще быстрее возрастать в будущем.

При всем различии между ЛБЗ и системой группа—поток у них имеется одна принципиальная общая черта: в обоих случаях локальные потоки выглядят как уменьшенные копии глобального потока расширения. Ускоряющиеся локальные потоки — новый феномен астрофизики, целиком обязанный эйнштейновскому всемирному антитяготению. Изучение локальных динамических эффектов темной энергии продолжается; в этой работе вместе с сотрудниками ГАИШ МГУ и Специальной астрофизической обсерватории РАН участвуют астрономы Санкт-Петербургского государственного университета, Института космических исследований РАН, Университета Турку (Финляндия), Университета Алабамы (США).

## «Безбрежное море проблем»

В нобелевской лекции Гинзбурга сказано: «В прошлом можно было и даже в наши дни можно встретиться с мнением, что в физике уже почти все сделано... Я считаю подобные мнения просто какой-то слепотой. Вся история физики, в том числе и состояние физики, и в частности астрофизики (включая космологию), на сегодняшний день убеждают в обратном. Перед нами еще, по моему мнению, безбрежное море нерешенных проблем».

Новейшей иллюстрацией в пользу этой точки зрения служат разворачивающиеся сейчас на наших глазах энергичные поиски экзопланет. У Гинзбурга об этой проблематике не говорится, а в 2017 г. речь идет уже о более чем трех с половиной тысячах экзопланет, причем немалая их доля может быть пригодна если не для жизни человека, то по крайней мере для существования на них тех или иных простейших форм живого. Среди новостей — свежее сообщение астрономов NASA об открытии неподалеку от Солнца (на расстоянии примерно 10 пк) системы из семи каменных планет в созвездии Водолея, три из которых находятся в «зоне обитаемости» (где предполагается умеренная температура и наличие воды в жидком состоянии). Оптимисты полагают, что если продолжать поиски с нынешним размахом, вскоре возможно открытие высокоразвитых форм живого в нашей Галактике. Или даже, как знать, внеземных цивилизаций в ней...■

## Литература / References


1. *Гинзбург В.Л.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными? УФН. 1971; 103: 87–119. [*Ginzburg V.L.* What problems of physics and astrophysics are of special importance and interest at present? Sov. Phys. Usp. 1971; 14: 21–39.]
2. *Гинзбург В.Л.* Физический минимум — какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века? УФН. 2007; 177: 346. [*Ginzburg V.L.* “Physical minimum” — what problems of physics and astrophysics seem now to be especially important and interesting at the beginning of the XXI century? Phys. Usp. 2007; 50: 332–332.]
3. *Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. et al.* Observational evidence from supernovae for an accelerating Universe and a cosmological constant. Astron. J. 1998; 116: 1009–1038.
4. *Perlmuter S., Aldering G., Goldhaber G. et al.* Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift supernovae. Astrophys. J. 1999; 517: 565–586.
5. *Чернин А.Д.* Космический вакуум. УФН. 2001; 171: 1153–1175. [*Chernin A.D.* Cosmic vacuum. Phys. Usp. 2001; 44: 1099–1118. ]
6. *Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al.* Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. Phys. Rev. Lett. 2016; 116: 061102.
7. *Abbott B., Abbott R., Abbott T.D. et al.* GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence. Phys. Rev. Lett. 2016; 116: 241103.
8. *Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al.* GW170104: Observation of a 50-solar-mass binary black hole coalescence at redshift 0.2. Phys. Rev. Lett. 2017; 118: 221101.
9. *Герценштейн М.Е., Пустовойт В.И.* К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот. ЖЭТФ. 1962; 43: 605–607. [*Gertsenshtein M.E., Pustovoit V.I.* On the detection of low frequency gravitational waves. JETP. 1963; 16: 433–435.]
10. *Шил М.А., Торн К.С.* Геометродинамика: нелинейная динамика искривленного пространства-времени. УФН. 2014; 187: 367–378. [*Scheel M.A., Thorne K.S.* Geometrodynamics: the nonlinear dynamics of curved spacetime. Phys. Usp. 2014; 57: 342–351.]
11. *Blinnikov S.I., Dolgov A.D., Poryko N.K., Postnov K.A.* Solving puzzles of GW150914 by primordial black holes. J. of Cosmol. and Astro-partical Phys. 2016; 11: 036.
12. *Масевич А.Г., Тутуков А.В.* Эволюция звезд: теория и наблюдения. М., 1988. [*Masevich A.G., Tutukov A.V.* Star evolution: theory and observations. Moscow, 1988 (in Russ.)]
13. *Тутуков А.В., Черепащук А.М.* Образование тесных двойных черных дыр, сливающихся за счет излучения гравитационных волн. Астрон. ж. 2017; 94(10). [*Tutukov A.V., Cherepashchuk A.M.* Close binary black hole formation due to gravitational-wave radiation. Astronomy reports. 2017; in press.]

14. *Тутуков А.В., Юнгельсон Л.Р.* Эволюция тесных двойных систем и звезды Вольфа-Райе. Научные информации Астросовета АН СССР. 1973; 27: 58–64. [*Tutukov A.V., Ungelson L.R.* Close binary system evolution and Wolf—Rayet stars. Nauchnye informatsii of Astrosovet of AN SSSR. 1973; 27; 58–64 (in Russ.)].
15. *Абубекеров М.К., Антохина Э.А., Богомазов А.И., Черепащук А.М.* Масса черной дыры в рентгеновской двойной системе M33 X-7 и эволюционный статус систем M33 X-7 и IC 10 X-1. Астрон. ж. 2009; 86: 260–271. [*Abubekerov M.K., Antokhina E.A., Bogomazov A.I., Cherepashchuk A.M.* The mass of the black hole in the X-ray binary M33 X-7and the evolutionary status of M33 X-7 and IC 10X-1Astronomy Reports. 2009; 53: 232–242.]
16. *Belczynski K., Holz D.E., Builk T., O'Shaughnessy R.* The first gravitational-wave source from the isolated evolution of two stars in the 40–100 solar mass range. Nature. 2016; 534: 512–515.
17. *Nazin S.N., Postnov K.A.* Gravitational radiation during Thorne-Zytkov object formation. Astron. Astrophys. 1995; 303: 789–794.
18. *Гинзбург В.Л.* О физике и астрофизике. М., 1995. [*Ginzburg V.L.* Theoretical Physics and Astrophysics. Pergamon Press, 2013. 2-nd ed.]
19. *Гинзбург В.Л.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? УФН. 1999; 169: 419–441. [*Ginzburg V.L.* What problems of physics and astrophysics seem now to be especially important and interesting (thirty years later, already on the verge of XXI century?) Phys. Usp. 1999; 42: 353–373.]
20. *Гинзбург В.Л.* О сверхпроводимости и сверхтекучести (что мне удалось сделать, а что не удалось), а также о «физическом минимуме» на начало XXI века. УФН. 2004; 174: 1240–1255. [*Ginzburg V.L.* On superconductivity and superfluidity (what I have and have not managed to do), as well as on the 'physical minimum' at the beginning of the XXI century (December 8, 2003). Phys. Usp. 2004; 47: 1155–1170.]
21. *Karachentsev I.D.* The Local Group and the other neighboring galaxy groups. Astron. J. 2005; 129: 178–188.
22. *Karachentsev I.D., Tully R.B., Dolphin A. et al.* The Hubble flow around the Centaurus A/M83 galaxy complex. Astron. J. 2007; 133: 504–517.
23. *Karachentsev I.D., Dolphin A., Tully R.B. et al.* Advanced camera for surveys imaging of 25 galaxies in nearby groups. Astron. J. 2006; 131: 1361–1376.
24. *Karachentsev I.D., Kashibadze O.G., Makarov D.I., Tully R.B.* The Hubble flow around the Local Group. MNRAS. 2009; 393: 1265–1274.
25. *Чернин А.Д.* Темная энергия и всемирное антитяготение. УФН. 2008; 178: 267–300. [*Chernin A.D.* Dark energy and universal antigravitation. Phys. Usp. 2008; 51: 253–282.
26. *Чернин А.Д.* Темная энергия в ближней Вселенной. УФН. 2013; 183: 741–747. [*Chernin A.D.* Dark energy in the nearby Universe: HST data, nonlinear theory and computer simulations. Phys. Usp. 2013; 56: 704–709.
27. *Byrd G.G., Chernin A.D., Teerikorpi P., Valtonen M.J.* Paths to Dark Energy: Theory and Observation. Berlin/Boston, 2012.
28. *Chernin A.D., Bisnovatyi-Kogan G.S., Teerikorpi P. et al.* Dark energy and the structure of the Coma cluster of galaxies. Astron. Astrophys. 2013; 553: id.A 101, 4 pp.
29. *Bisnovatyi-Kogan G.S., Chernin A.D.* Dark energy and the key physical parameters of clusters of galaxies. Astrophys. Space Sci. 2012; 338: 337–343.
30. *Chernin A.D., Emelyanov N.V., Karachentsev I.D.* Dark energy domination in the local flow of giant galaxies. MNRAS. 2015; 449: 2069–2078.

## Ginzburg's List: Gravitational waves, black holes, dark energy

A.M.Cherepashchuk[1], A.D.Chernin[1]
[1]*Sternberg Astronomical Institute of Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)*

Ginzburg's List is a brief account of problems in physics and astronomy that were seen by Academician Vitaly Lazarevich Ginzburg (1916–2009) as most important, interesting, and actual. It was collected by him for the first time in 1971, and then renewed with time for three decades reflecting the progress in science as well as new prospects and key tasks for the future. Ginzburg included the latest version of the List to his Nobel Lecture (2003). Astrophysics was presented among the basic topics of the List from the very beginning. The emphasis was made by Ginzburg to relativistic astrophysics and cosmology; and General Relativity (GR) was considered as the reliable theory ground for predictions and discoveries in physics and astronomy. The fundamental ideas in this area of science found further development in recent theory and observational studies. The problem of the dynamics of the Universe considered by Ginzburg as the «basic question of cosmology» was solved in observations of 1998–1999 when dark energy that revealed itself in the accelerating expansion of the Universe was discovered at global cosmological distances. The other most important recent advantage was observational discovery in 2015–2017 of gravitational waves, predicted earlier by GR. This result provides also a new strong evidence for the existence of black holes that were also predicted by GR.

**Keywords:** General Relativity, black holes, gravitational waves, neutron stars, dark energy, cosmology.

# Хроники черной дыры, записанные в молекулярных облаках

Е.М.Чуразов[1], И.И.Хабибуллин[1], Р.А.Сюняев[1]
[1]*Институт космических исследований РАН (Москва. Россия)*

Центральная зона нашей Галактики — это чрезвычайно интересная область, в которой «живут» самые экзотические объекты, свойства которых определяются совершенно разными разделами физики. Среди таких объектов — сверхмассивная черная дыра, известная как источник Стрелец A*, и гигантские молекулярные облака, разбросанные по области в сотни световых лет. Оказывается, что облака и черная дыра могут многое рассказать друг о друге. Облака хранят информацию о вспышках рентгеновского излучения от черной дыры, случившихся сотни лет назад. В свою очередь, вспышки помогают прояснить внутреннее устройство молекулярных облаков.

**Ключевые слова:** центр Галактики, черные дыры, рентгеновское излучение, межзвездная среда.

Черные дыры Виталий Лазаревич Гинзбург называл «самыми важными объектами физики и астрофизики». Сегодня мы знаем о множестве черных дыр звездных масс в двойных системах, а также сверхмассивных черных дыр. Ближайшая к нам сверхмассивная черная дыра расположена в динамическом центре нашей Галактики.

## Насколько ярка черная дыра в центре Галактики?

Наша Галактика Млечный Путь — сравнительно обычная спиральная галактика, каких много во Вселенной. Солнечная система расположена на периферии звездного диска, на расстоянии примерно 8–8.5 кпк от центра Галактики. В ее центре, как и в других галактиках, находится сверхмассивная черная дыра, известная как радиоисточник Стрелец A* (рис.1). Массы таких черных дыр отслеживают характеристики самих галактик, например полные массы звезд в центральном «балдже» или типичный разброс скоростей звезд в нем. Подобные аргументы дают оценку массы нашей черной дыры по-

© Чуразов Е.М., Хабибуллин И.И., Сюняев Р.А., 2017

***Евгений Михайлович Чуразов,*** *член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий Института космических исследований (ИКИ) РАН. Научные интересы — теоретическая астрофизика, рентгеновская астрономия, скопления галактик.*

***Ильдар Инзилович Хабибуллин,*** *кандидат физико-математических наук, научный сотрудник того же отдела. Занимается моделированием рентгеновского излучения астрофизических объектов, методиками и интерпретацией их наблюдений.*

***Рашид Алиевич Сюняев,*** *академик, главный научный сотрудник того же отдела. Область научных интересов — теоретическая астрофизика, физические процессы во Вселенной и реликтовое излучение, рентгеновская астрономия.*

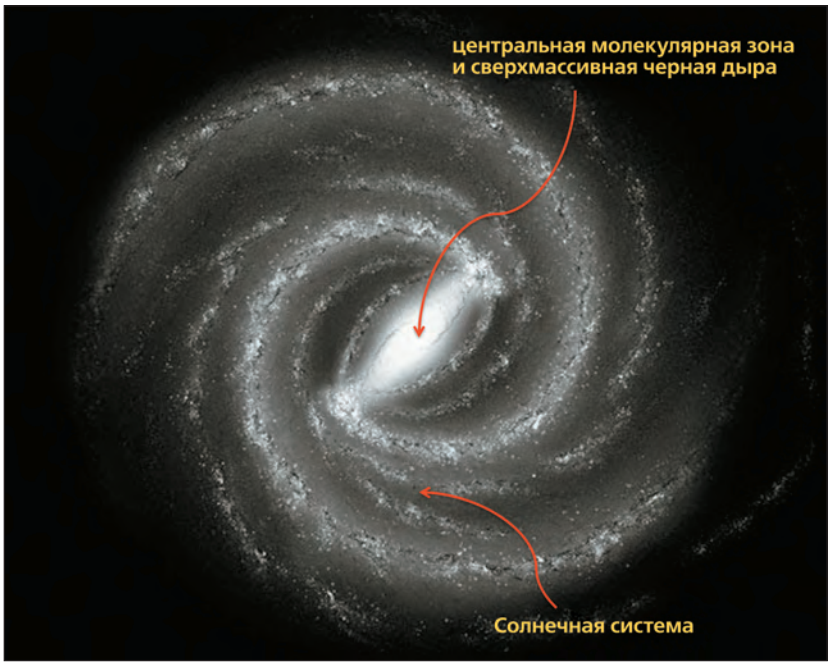



Рис.1. Схематичная картина нашей Галактики (вид из точки, расположенной над ней), на которой показано расположение Солнца и центра Галактики.

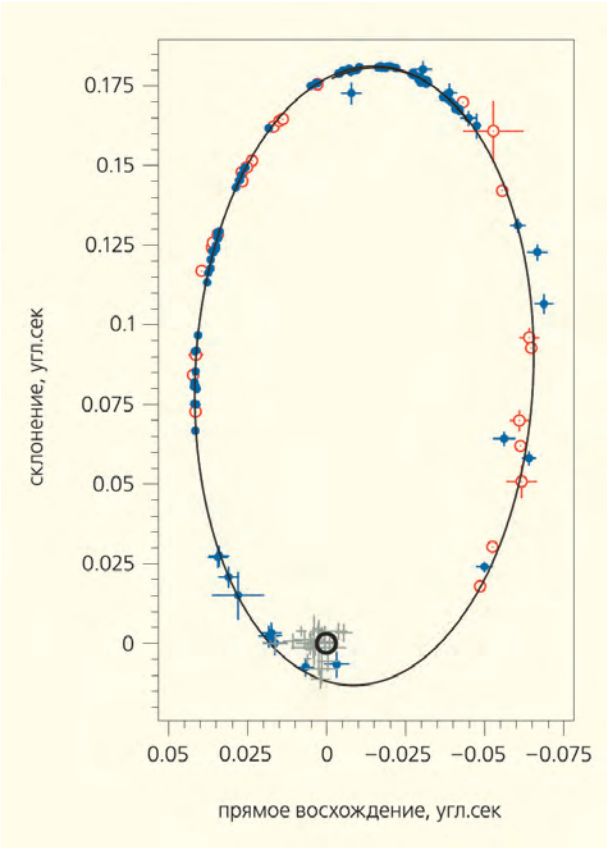



Рис.2. Наблюдаемая орбита звезды S2, делающей полный оборот вокруг сверхмассивной черной дыры за 16 лет [1]. Кружок показывает положение черной дыры.

рядка 6–8 млн $M_\odot$. Но в случае нашей Галактики мы имеем гораздо более надежные измерения массы черной дыры, прежде всего по движению отдельных звезд вокруг нее (рис.2). Такие измерения стали возможными с развитием инфракрасной астрономии и длительного мониторирования непосредственной окрестности черной дыры. Сегодня орбиты нескольких звезд, пролетающих около нее на расстоянии меньше 1 Мпк, известны с хорошей точностью, и применение законов Кеплера (с учетом релятивистских поправок) дает массу черной дыры в 4 млн $M_\odot$.

При такой гигантской массе источника Стрелец A* мог бы быть ярчайшим объектом на всем небе. Светит, конечно, не сама черная дыра, а вещество, падающее (аккрецирующее) на нее. Теория аккреции вещества на черные дыры предсказывает, что светимость объекта с массой 4 млн $M_\odot$ может достигать $10^{44}$ эрг/с — так называемой эддингтоновской светимости

$$L_{\mathrm{Edd}} = \frac{4\pi G M m_{\mathrm{p}} c}{\sigma_{\mathrm{T}}} \approx 10^{38}\left(\frac{M}{M_\odot}\right) \text{ эрг/с},$$

где $G$ — гравитационная постоянная, $m_{\mathrm{p}}$ — масса протона, $c$ — скорость света, $s_{\mathrm{T}}$ — сечение томсоновского рассеяния. Ее величина линейно связана с массой $M$ черной дыры. При большей светимости давление излучения способно отбросить вещество от черной дыры и ограничить темп аккреции. Именно гигантская светимость таких объектов с массами в миллиарды солнечных позволяет нам регистрировать излучения от них с космологических расстояний, когда возраст Вселенной не превышал 5% от сегодняшнего. Но ничего даже близко приближающегося к уровню эддингтоновской светимости мы не видели от источника Стрелец A* в современную эпоху. Например, его рентгеновская светимость не превышает одной миллиардной от эддингтоновской. Современные обсерватории регистрируют вспышки от источника (примерно раз в день), но и во время вспышек светимость остается ничтожно малой — многие галактические черные дыры звездных масс в десятки и сотни раз ярче источника Стрелец A*. Означает ли это, что черная дыра в центре Млечного Пути всегда была столь же тусклой? Конечно, нет. На ранних этапах образования Галактики, миллиарды лет назад, когда шел период интенсивного звездообразования, рост черной дыры почти наверняка сопровождался мощным излучением. Активность источника Стрелец A* в более близкую

эпоху (миллионы лет назад) связывают и с так называемыми пузырями Ферми (рис.3) — огромными структурами, размером несколько килопарсеков, обнаруженными спутником имени Ферми (НАСА) в гамма-диапазоне. Однако в этом случае прямых свидетельств, что образование пузырей сопровождалось мощным излучением, нет. Например, в скоплениях галактик сверхмассивные черные дыры надувают пузыри релятивистской плазмы [3], оставаясь при этом слабыми источниками излучения.

Пузыри Ферми формировались миллионы лет назад. Можно ли найти свидетельства, что источник Стрелец A* был ярок в еще более близкую к нам эпоху? Оказывается, да. И центральную роль в этом играют облака молекулярного газа, которые часто встречаются вблизи центра Галактики, в области, называемой Центральной молекулярной зоной (ЦМЗ), имеющей размер в несколько сотен парсеков.

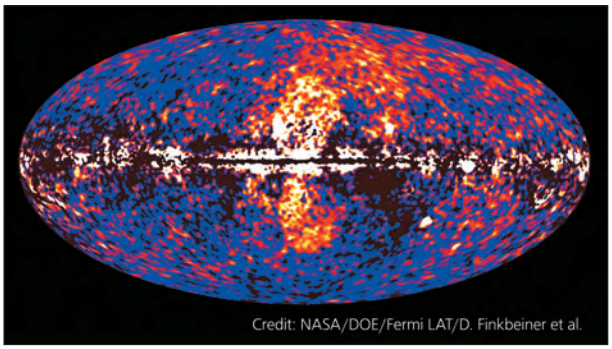



Рис.3. «Пузыри Ферми», обнаруженные обсерваторией имени Ферми в гамма-лучах (например, [2]). На карте, нарисованной в галактических координатах, сверхмассивная черная дыра находится в центре карты, а пузыри — это яркие области сверху и снизу от нее. Многие модели связывают формирование пузырей с активностью сверхмассивной черной дыры миллионы лет назад.

## Молекулярный газ в центре Галактики

Молекулярные облака состоят из сравнительно плотного для межзвездной среды газа (плотность выше 100 частиц на кубический сантиметр) с температурой около 100 К или ниже. Основную массу облаков обеспечивают молекулы водорода $H_2$. Однако наблюдать молекулярный водород очень сложно — у такой симметричной молекулы отсутствуют разрешенные вращательные и вибрационно-вращательные переходы. Поэтому основным источником информации о молекулярных облаках служат линии других молекул, например, CO, SiO, CS и т.д. На сегодняшний день множество различных молекул, часто довольно сложных, были зарегистрированы в молекулярных облаках, в том числе расположенных в ЦМЗ. Разные молекулы характерны для газа с различными плотностями и температурами, что позволяет получать информацию о внутренней структуре облаков, а также пересчитывать поток излучения молекулярных линий в полную массу газа. Такой пересчет не всегда точен, но по порядку величины массу оценить можно. Итак, наблюдения молекулярных линий дают нам надежные карты распределения газа и оценку его массы, в том числе в ЦМЗ (рис.4, сверху). Самые массивные облака имеют массы до миллионов масс Солнца, хотя более типичны облака с массой порядка сотен тысяч солнечных.

Оказывается, что присутствие холодного газа в окрестности источника Стрелец A* может помочь нам узнать, насколько мощным было рентгеновское излучение сверхмассивной черной дыры в прошлом. Сами молекулярные облака, состоящие из холодного газа, не служат источниками рентгеновского излучения. Тем не менее наблюдения телескопа АРТ-П на советско-французской орбитальной обсерватории «Гранат» в 90-х годах прошлого века показали, что карты диффузного жесткого (с энергией выше 10 кэВ) рентгеновского излучения напоминают карты распределения молекулярного газа (рис.5, слева). Через несколько лет этот вывод подтвердила японская обсерватория ASCA, которая обнаружила линию на энергии 6.4 кэВ, излучаемую теми же облаками (рис.5, справа). Рентгеновское излучение от молекулярных облаков было также зарегистрировано обсерваториями INTEGRAL [9], Chandra и XMM-Newton (например, [10–11]).

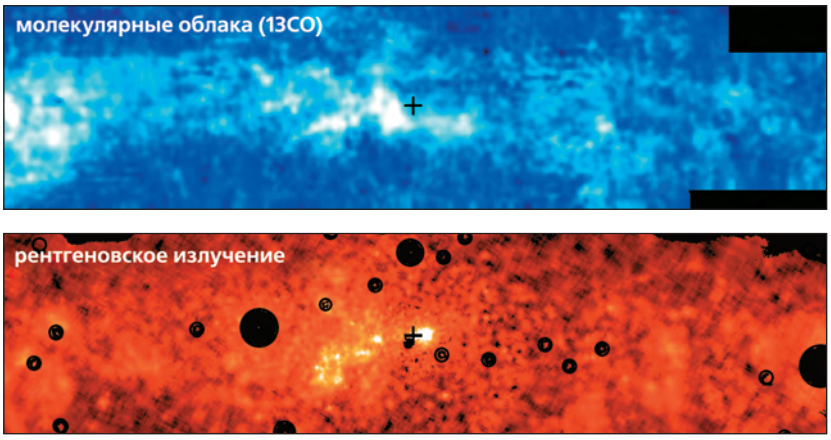



Рис.4. Распределение молекулярных облаков в ЦМЗ по линии молекулы CS (вверху) [4]. Нижняя карта показывает распределение поверхностной яркости рентгеновского излучения, отраженного молекулярными облаками [5].

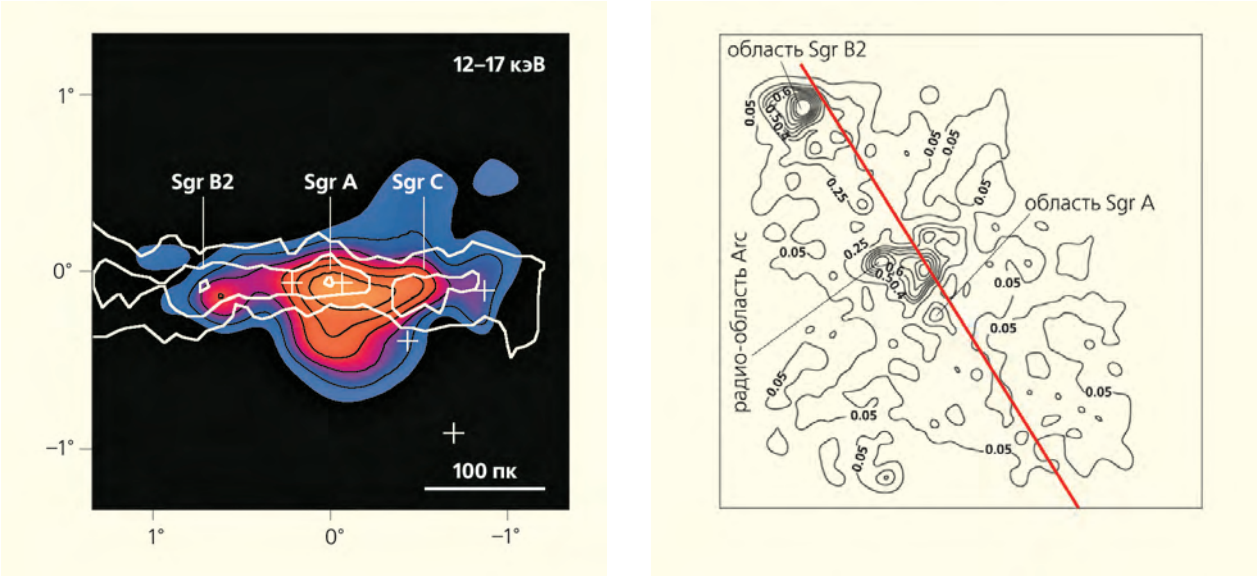



Рис.5. Карта рентгеновского излучения, полученная телескопом АРТ-П (слева). Контурами показано распределение молекулярных облаков [6, 7]. Распределение яркости во флуоресцентной линии нейтрального железа на энергии 6.4 кэВ — по данным обсерватории АСКА (справа) [8]. Галактическая плоскость на этом рисунке показана красной линией.

Все эти факты можно объяснить, предположив, что холодное вещество облаков облучается мощным внешним потоком рентгеновских фотонов. Жесткое излучение тогда связано с рассеянием на электронах в молекулах водорода, а линия 6.4 кэВ возникает при ионизации внутренних оболочек атомов железа и последующего флуоресцентного излучения. При этом рассеянное излучение пропорционально интенсивности падающего излучения и плотности рассеивающего газа. С этой гипотезой есть одна проблема — на современных рентгеновских картах ЦМЗ мы не видим достаточно ярких источников, способных обеспечить требующийся поток. Эта проблема была решена предположением, что таким источником оказывается именно сверхмассивная черная дыра, причем вспышка рентгеновского излучения произошла более 100 лет назад, задолго до появления рентгеновской астрономии. Тот факт, что сам источник уже погас, но мы продолжаем наблюдать его излучение, рассеянное молекулярными облаками, связан исключительно с конечной скоростью распространения света.

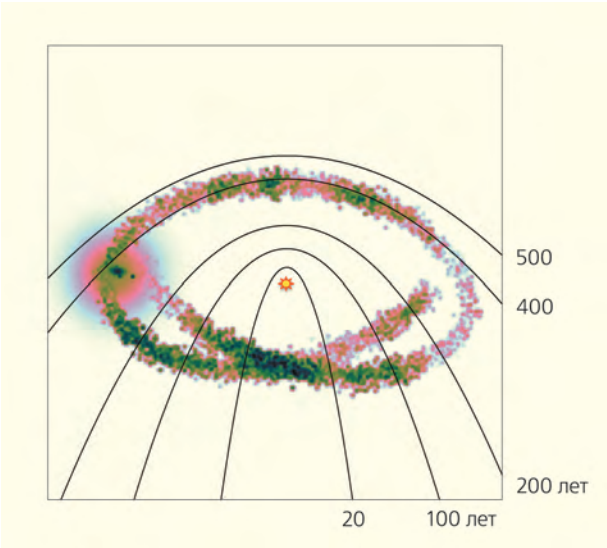



Рис.6. Геометрическое место точек, рассеяние в которых приводит к одинаковому запаздыванию по сравнению с самой вспышкой. Время, прошедшее с момента вспышки, указано около каждой кривой. Для иллюстрации показана модель распределения газа, использованная в работе [5]. Данная модель основана на предположении, что значительная часть молекулярного газа движется по единой (сложной) орбите в потенциале Галактики [12].

На рис.6 схематично показана природа возникновения запаздывания рассеянного сигнала. Рентгеновские фотоны, распространяющиеся непосредственно в сторону Земли, могли бы быть зарегистрированы более 100 лет назад (если бы в ту пору существовали рентгеновские спутники). Те же фотоны, которые сначала летели в сторону облака, а после рассеяния летят в сторону Земли, достигнут наблюдателя с задержкой, связанной с более длинной траекторией. Массивные облака отстоят от источника Стрелец A* на 30–50 пк, поэтому и время запаздывания составляет порядка 100 лет. Можно попытаться сделать более точную оценку — все облака, имеющие одинаковое запаздывание, расположены вдоль поверхности эллипсоида (например, [13]). Действительно, из школьного курса геометрии мы помним, что эллипс — это геометри-

ческое место точек, для которых сумма расстояний до двух заданных точек (фокусов) одинакова. В нашем случае в одном фокусе эллипса находится источник Стрелец A*, а в другом — наблюдатель. И конечно, сумма расстояний больше, чем расстояние между фокусами, на фиксированную величину. Следовательно, в каждый конкретный момент времени мы должны видеть все облака, которые пересекает эллипсоид. С течением времени эллипсоид должен эволюционировать (запаздывание увеличивается), и область, «освещаемая» вспышкой, расширяется и отодвигается на бо́льшие расстояния (рис.6). При этом часть облаков становится невидимой, а другие, наоборот, яркими, так как «эллипсоид» проходит через них. Подобная эволюция проиллюстрирована на рис.7, где показаны результаты моделирования распространения освещающего фронта через ЦМЗ. Заметим, что фронт может распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Никакого нарушения специальной теории относительности при этом не происходит, как и в стандартной задаче про скорость движения солнечного зайчика на стене. Такие «сверхсветовые» движения действительно наблюдаются, лишний раз подтверждая гипотезу, что мы фактически наблюдаем отражение излучения источника Стрелец A* в «зеркале» молекулярного газа. Заметим, что быстрые изменения на масштабах нескольких лет (рис.8) сразу накладывают жесткое ограничение на продолжительность вспышки. В дальнейшем мы будем предполагать, что вспышка была одна и короткая (короче, чем несколько лет).

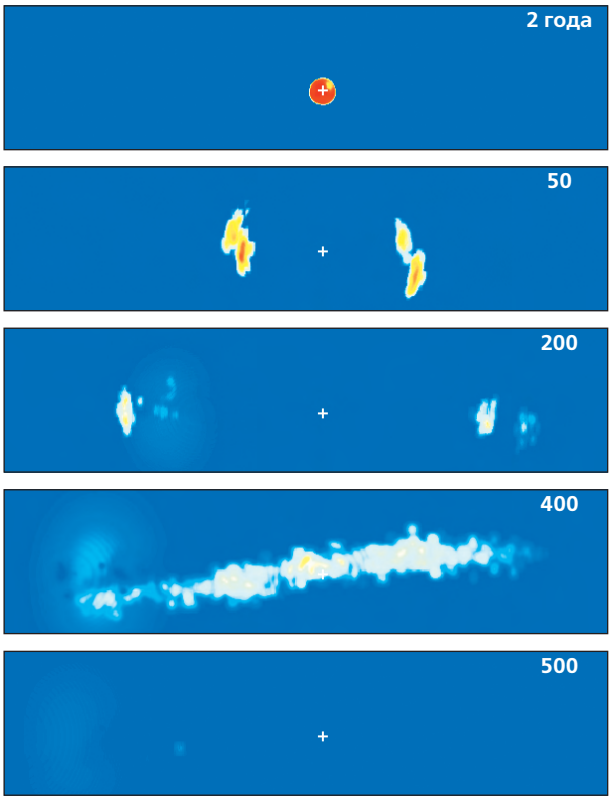



Рис.7. Моделирование распространения вспышки по молекулярному газу (геометрия задачи показана на рис.6). Числа на отдельных панелях показывают время, прошедшее с момента вспышки. С течением времени одни облака «гаснут», тогда как другие становятся яркими. Через примерно 500 лет после вспышки свет покидает ЦМЗ.

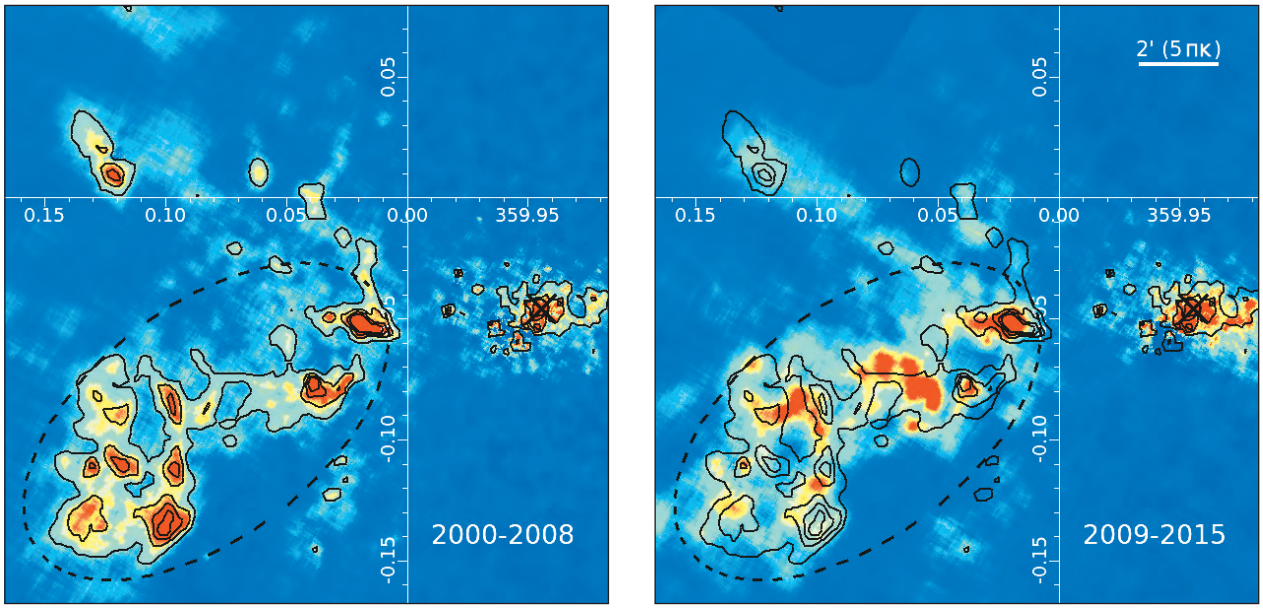



Рис.8. Рентгеновские изображения участка ЦМЗ, полученные обсерваторией Chandra в 2000–2008 и 2009–2015 гг. Видно, как заметно меняется морфология и яркость отдельных участков. Такие быстрые изменения говорят о кажущемся «сверхсветовом» характере переменности, что является важным предсказанием модели отражения.

## Реконструкция 3D-картины молекулярных облаков

Казалось бы, зная положение облаков, мы можем сразу рассчитать время, которое прошло с момента вспышки, используя простую геометрию задачи, показанную на рис.6. К сожалению, мы хорошо знаем лишь положение молекулярных облаков в проекции на небесную сферу, в то время как взаимное расположение источника Стрелец A* и облаков вдоль луча зрения известно очень плохо. Проблему можно устранить, если измерить скорость перемещения фронта вдоль луча зрения. Эта скорость может быть точно предсказана, и она зависит исключительно от времени, прошедшего с момента вспышки, и от расстояния от источника до облака. Вблизи источника скорость составляет половину скорости света, а на больших проекционных расстояниях неограниченно возрастает. Чтобы определить ее из данных наблюдений, достаточно предположить, что на масштабах заметно меньших, чем размер облака, флуктуации плотности имеют изотропную структуру. Другими словами, характерные размеры неоднородностей плотности одинаковы вдоль луча зрения и в направлении, перпендикулярном ему.

При таких предположениях изменения рентгеновского потока в данном месте молекулярного облака со временем должны соответствовать (в статистическом смысле) изменениям рентгеновского потока на индивидуальных изображениях. Фактически, со временем фронт «сканирует» облако вдоль луча зрения. Единственный неизвестный параметр в этой задаче — коэффициент пересчета времени между отдельными наблюдениями в расстояние, что и является скоростью движения фронта вдоль луча зрения. Анализ существующих данных для наиболее яркого облака показал, что эта скорость составляет 70% от скорости света. Данное значение сразу показывает, что, с учетом положения облака на небе относительно источника Стрелец A*, время, прошедшее с момента вспышки, составляет 110 лет. Следовательно, для отдельных наблюдений мы можем восстановить положение эллипсоида и определить плотность молекулярного газа вдоль его поверхности. Повторяя эту процедуру для всех наблюдений, мы восстановим трехмерное распределение плотности газа (рис.9).

Конечно, пока удается получить 3D-картину только в ограниченном объеме, «просканированном» фронтом за 15 лет наблюдений. В принципе всю ЦМЗ можно просканировать за следующие 400–500 лет. Это задача для будущих поколений. Но уже теперь мы можем, кроме возраста вспышки, оценить и полный поток энергии, излученный сверхмассивной черной дырой, если предположим, что плотность рассеивающего газа известна из наблюдений молекулярных линий. Подобные рассуждения приводят к сравнительно небольшим (для сверхмассивной черной дыры) значениям энергии — порядка $10^{47}$–$10^{48}$ эрг. Подобную энергию сверхмассивная черная дыра, излучающая на эддингтоновском пределе, могла

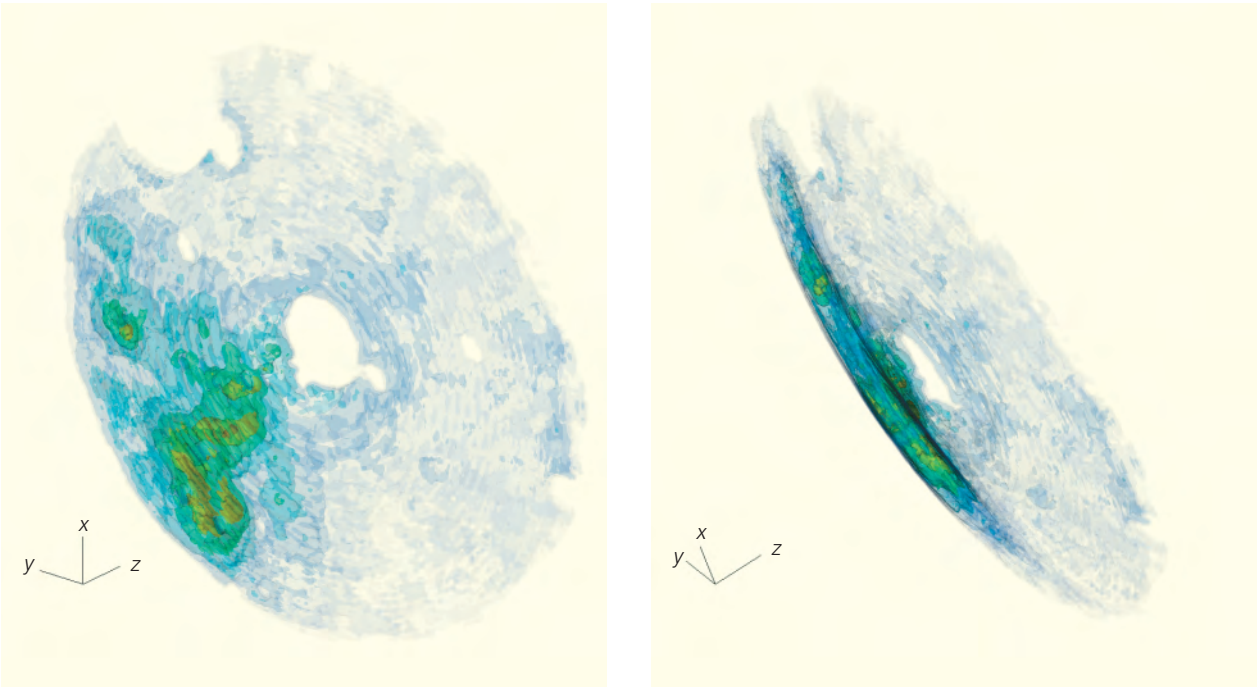



Рис.9. Восстановленное трехмерное распределение молекулярного газа на основе рентгеновских наблюдений [14]. Показаны две разные проекции.

бы излучить за несколько часов. Полная масса вещества, «проглоченная» черной дырой во время вспышки, сравнима с массой планеты. Событие такого масштаба не выглядит чем-то совершенно необыкновенным.

## Тонкая структура молекулярных облаков

Еще более привлекательна возможность исследовать внутреннее устройство молекулярных облаков, используя рентгеновское излучение сверхмассивной черной дыры в качестве своеобразной подсветки [15]. Структура молекулярных облаков очень сложна — в сверххолодном газе присутствуют сверхзвуковые турбулентные движения, которые создают многочисленные сильные ударные волны. Такие волны сжимают газ, пересекаются, формируя сложную картину из плотных и более разреженных областей. При этом увеличение температуры при сжатии газа компенсируется возрастающими потерями энергии газа за счет излучения. В численных расчетах обычно считается, что уравнение состояния газа изотермическое, т.е. давление зависит только от плотности газа. В самых плотных и компактных областях начинает играть роль самогравитация газа, и динамика газа определяется уже не турбулентностью, а тяготением. В этих областях начинается коллапс газа в еще более плотные «ядра», где в конечном итоге и формируются звезды.

Удивительно, что в ЦМЗ, несмотря на огромные массы молекулярного газа, темп звездообразования не очень велик. В пересчете на единицу массы молекулярного газа эффективность звездообразования в ЦМЗ на порядок ниже, чем в других облаках. Именно попытки понять, какие условия необходимы для эффективного звездообразования, подогревают интерес к проблеме тонкой структуры молекулярных облаков. Возможно, уровень турбулентности в ЦМЗ настолько высок, что турбулентность не помогает созданию плотных областей, а, наоборот, препятствует их возникновению. Важнейшей характеристикой, которая позволила бы провести детальное сравнение численных расчетов и наблюдений, могла бы стать функция распределения плотности в объеме облака. С наблюдательной точки зрения, серьезным препятствием оказывается то, что обычно (например, при наблюдении молекулярных линий) мы видим проекцию всего облака на небесную сферу, т.е. измеряем не распределение плотности в объеме облака, а распределение колонки вещества в пересчете на единицу площади. Наряду с этим условия возбуждения молекул отличаются в разных местах облака, что делает пересчет из потока в плотность сильно неоднозначным. В результате для облака со сложной структурой восстановить функцию распределения плотности очень сложно.

Эти трудности можно обойти, если использовать рентгеновскую «подсветку» излучением черной дыры. Действительно, для короткой (порядка года) вспышки рентгеновского излучения очень узкий слой высвечивается в каждый момент времени, как это показано на рис.6. Для самого яркого на сегодня облака в ЦМЗ толщина слоя будет всего 0.2 пк! Таким образом, рентгеновские наблюдения могут напрямую дать функцию распределения плотности на масштабах меньше парсека. Более того, эффективность рассеяния практически не зависит от ионизационного состояния или деталей молекулярной химии, давая возможность прямых измерений плотности. Единственным ограничением может стать большая оптическая толщина самых плотных областей, сделав их невидимыми. К счастью, с учетом проникающей способности рентгеновских лучей это происходит только в экстремально плотных областях. Первые эксперименты, основанные на этом подходе, показали неплохое согласие рентгеновских наблюдений с результатами численных расчетов. В частности, функция распределения плотности имеет форму, похожую на предсказания для сверхзвуковой турбулентности. Хотя существующих данных пока недостаточно для однозначного вывода, это внушает надежду, что рентгеновские наблюдения смогут помочь решить вопрос о тонкой структуре молекулярных облаков. Без вспышки от источника Стрелец A* сделать такой анализ было бы невозможно.

## Что могут дать новые обсерватории?

В заключение коротко остановимся на перспективах дальнейших исследований отраженного излучения будущими рентгеновскими обсерваториями. Важное предсказание описанного выше сценария — сильная поляризация рентгеновского излучения, возникающая при рассеянии фотонов на электронах (комптоновское рассеяние). В настоящее время в НАСА и ЕКА разрабатываются несколько обсерваторий, способных измерять поляризацию рентгеновских фотонов по направлению вылета фотоэлектрона в веществе детектора. Чувствительность этих обсерваторий позволит надежно измерять поляризацию от ярких облаков в ЦМЗ. Плоскость поляризации должна быть перпендикулярна линии, соединяющей источник и облако. Следовательно, наблюдения нескольких облаков позволят напрямую локализовать первичный источник рентгеновских фотонов и подтвердить, что это действительно Стрелец A*. С другой стороны, при комптоновском рассеянии степень поляризации определяется углом рассеяния, который зависит исключительно от взаимного расположения облака и источника вдоль луча зрения. Следовательно, измерив степень поляризации, мы получим независимый метод восстанов-

Рис.10. Общий вид телескопа eРозита обсерватории Спектр-Рентген-Гамма. Высокая чувствительность и большое поля зрения позволят вести поиск переменных источников во время обзора всего неба (снимок печатается с разрешения Института внеатмосферной физики общества Макса Планка — МПЕ).

ления 3D-распределения молекулярного газа. Подобные исследования уже включены в программы этих проектов.

Другим важнейшим этапом станет запуск в космос криогенных рентгеновских болометров, способных измерять энергию фотонов с точностью в несколько электронвольт. Подобные детекторы уже доказали свою эффективность на японском спутнике Hitomi, который, к сожалению, разрушился, проработав на орбите только один месяц. Нет сомнений, что в ближайшие десятилетия обсерватории типа Athena (EKA) или Lynx (НАСА) смогут измерить энергию флуоресцентной линии железа с точностью, которая позволит по эффекту Доплера определить скорость движения газа, рассеивающего рентгеновское излучение источника Стрелец A*. Таким образом, кроме 3D-карты плотности в нашем распоряжении будут и измерения скорости газа с точностью в несколько километров в секунду. Это даст возможность связать рентгеновские и молекулярные данные, используя информацию о скорости движения газа, а также проверить, находятся ли молекулярные облака на круговых орбитах в гравитационном потенциале центра Галактики.

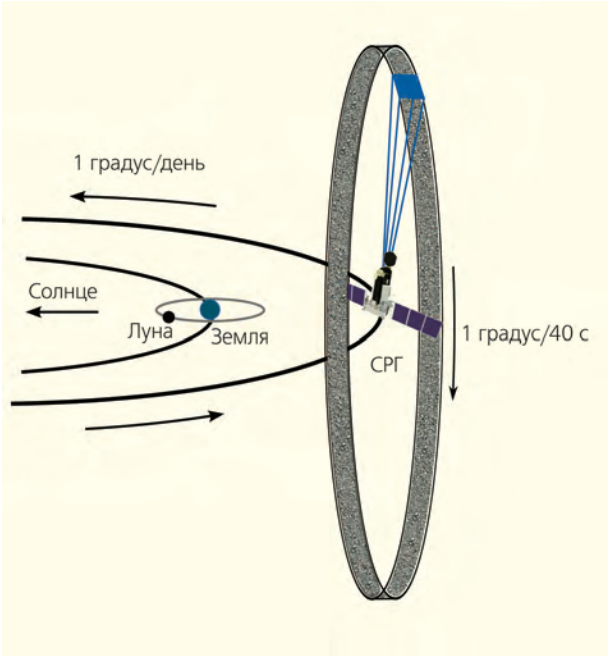



Рис.11. Сканирование неба обсерваторией СРГ во время обзора. Ось вращения направлена на Солнце, в то время как оси телескопов перпендикулярны направлению на Солнце.

Кроме того, важнейший вклад в исследование мощных вспышек от сверхмассивных черных дыр в других галактиках должна внести российско-германская обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма» (СРГ). Если описанный выше сценарий универсален, можно ожидать, что время от времени (скажем, раз в сто или тысячу лет) «тусклые» сверхмассивные черные дыры в ядрах обычных галактик на время (порядка года) становятся в миллионы раз ярче. В этом случае обсерватория СРГ, которая в течение четырех лет должна провести восемь обзоров всего неба в рентгеновских лучах (рис.10, 11), сможет обнаружить такие вспыхивающие сверхмассивные черные дыры и ответить на вопрос, насколько «обычно» ведет себя источник Стрелец A* по сравнению с ядрами других галактик.

Итак, воспользовавшись соседством сверхмассивной черной дыры с молекулярными облаками, мы можем одновременно исследовать историю вспышек черной дыры и внутреннюю структуру облаков. Подобные исследования были бы невозможными без этого необычного «симбиоза». Новые обсерватории открывают поистине уникальные возможности диагностики газа в центре Галактики — от поляризации до скоростей движения облучаемого вещества — и смогут дать много важнейшей информации о физических процессах в этой интереснейшей области Млечного Пути, а также в центрах других галактик.

Один из авторов в свои аспирантские и эмэнэсовские годы любил ходить на семинары в Госу-

дарственном астрономическом институте имени П.К.Штернберга, которые вели тогда В.Л.Гинзбург, Я.Б.Зельдович и И.С.Шкловский. Запомнился особый интерес Виталия Лазаревича к необычному радиоисточнику Стрелец A*, расположенному в центре нашей Галактики. Это сейчас мы знаем, что данный источник с удивительным радиоспектром окружает черную дыру с массой в 4 миллиона Солнц. Очевидно, что статья, предлагаемая сегодня вниманию читателям «Природы», была бы интересна для В.Л.: тут и мощнейшая рентгеновская вспышка, происшедшая лет 100 назад, и ее эхо (зайчик) во флуоресцентной линии железа, бегущее на наших глазах с релятивистской скоростью по гигантским облакам молекулярного газа, окружающим центр нашей Галактики — радиоисточник Стрелец A*.

Говоря про отражение рентгеновского излучения от молекулярных облаков, мы хотим еще раз вспомнить о важнейшем вкладе в эти исследования профессора РАН, лауреата Премии Президента РФ для молодых ученых Михаила Геннадьевича Ревнивцева (1974–2016). С помощью обсерватории ИНТЕГРАЛ он первым обнаружил, что отраженное излучение простирается вплоть до энергий в 200 кэВ, а восстановленный широкополосный рентгеновский спектр похож на спектры, излучаемые активными ядрами галактик.■

## Литература / References


1. *Gillessen S., Eisenhauer F., Fritz T.K et al.* The distance to the Galactic Center. Advancing the physics of cosmic distances. 2013; 289: 29–35.
2. *Dobler G., Finkbeiner D.P., Cholis I. et al.* The Fermi Haze: A Gamma-ray counterpart to the microwave haze. Astrophys. J. 2010; 717: 825–842.
3. *Churazov E., Forman W., Jones C., Böhringer H.* Asymmetric, arc minute scale structures around NGC 1275. Astronomy and Astrophysics. 2000; 356: 788–794.
4. *Tsuboi M., Handa T., Ukita N.* Dense molecular clouds in the Galactic Center Region. I. Observations and data. Astrophys. J. Supplement Series. 1999; 120: 1–39.
5. *Churazov E., Khabibullin I., Ponti G., Sunyaev R.* Polarization and long-term variability of Sgr A* X-ray echo. MNRAS. 2017; 468: 165–179.
6. *Sunyaev R.A., Markevitch M., Pavlinsky M.* The center of the Galaxy in the recent past — A view from GRANAT. Astrophys. J. 1993; 407: 606–610.
7. *Markevitch M., Sunyaev R.A., Pavlinsky M.* Two sources of diffuse X-ray emission from the Galactic Centre. Nature. 1993; 364: 40–42.
8. *Koyama K., Maeda Y., Sonobe T. et al.* ASCA view of our Galactic Center: remains of past activities in X-rays? Publications of the Astronomical Society of Japan. 1996; 48: 249–255.
9. *Revnivtsev M.G., Churazov E.M., Sazonov S.Y. et al.* Hard X-ray view of the past activity of Sgr A* in a natural Compton mirror. Astronomy and Astrophysics. 2004; 425: L49–L52.
10. *Ponti G., Terrier R., Goldwurm A., Belanger G., Trap G.* Discovery of a superluminal Fe K echo at the Galactic Center: The glorious past of Sgr A* preserved by molecular clouds. Astrophys. J. 2010; 714: 732–747.
11. *Clavel M., Terrier R., Goldwurm A. et al.* Echoes of multiple outbursts of Sagittarius A* revealed by Chandra. Astronomy and Astrophysics. 2013; 558: A32, 1–15.
12. *Kruijssen J.M.D., Dale J.E., Longmore S.N.* The dynamical evolution of molecular clouds near the Galactic Centre-I. Orbital structure and evolutionary timeline. MNRAS. 2015; 447: 1059–1079.
13. *Couderc P.* Les auréoles lumineuses des Novæ. Annales d'Astrophysique. 1939; 2: 271–302.
14. *Churazov E., Khabibullin I., Sunyaev R., Ponti G.* Not that long time ago in the nearest galaxy: 3D slice of molecular gas revealed by a 110 yr old flare of Sgr A*». MNRAS. 2017; 465: 45–53.
15. *Churazov E., Khabibullin I., Sunyaev R., Ponti G.* Can Sgr A* flares reveal the molecular gas density PDF? MNRAS. 2017; 471: 3293–3304.


## Chronicles of supermassive black hole, written in molecular clouds

E.M.Churazov[1], I.I.Khabibullin[1], R.A.Sunyaev[1]
[1]*Space Research Institute, RAS (Moscow, Russia)*

Central region of our Galaxy is an exceptionally interesting place that harbors a number of the most exotic objects, which properties are governed by entirely different branches of physics. Among them there are a supermassive black hole, known as Sgr A*, and giant molecular clouds scattered over few hundred light-years region. It turns out that the molecular clouds and the black hole can tell us a lot about each other. The clouds keep record of powerful X-ray flares from the black hole that happened hundreds years ago. The same flares help us to understand the inner structure of the molecular clouds.

**Keywords:** Galactic Center, black holes, X-rays, interstellar medium.

# Как измеряют магнитные поля галактик

## От книги В.Л.Гинзбурга до фарадеевского синтеза

Д.Д.Соколов
*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (Москва. Россия)*

Чуть больше столетия назад американский астроном Джордж Хейл впервые измерил расщепление спектральных линий в излучении, приходящем от солнечных пятен. Так впервые было определено магнитное поле на Солнце. С помощью эффекта Зеемана измеряют магнитное поле и на других звездах, однако этот метод перестает уверенно работать для магнитных полей галактик, поскольку те существенно слабее звездных магнитных полей. Магнитные поля галактик измеряют прежде всего с помощью эффекта Фарадея, т.е. вращения плоскости поляризации в оптически активных средах. Эффект Фарадея применяется в промышленности для измерения содержания сахара в растворах. Молекулы сахара могут иметь две зеркально симметричных конфигурации, причем только одна из них производится биологическими процессами. Поэтому раствор сахара является зеркально асимметричной средой. При прохождении света через зеркально асимметричную среду плоскость поляризации поворачивается. Замагниченная плазма — тоже зеркально асимметричная среда и тоже вращает плоскость поляризации проходящего через нее излучения. Поскольку величина этого вращения пропорциональна толщине слоя плазмы, удается использовать большой пространственный размер галактик. В том, что использование эффекта Фарадея стало основным источником наших знаний о магнитных полях галактик, большую роль сыграла замечательная книга В.Л.Гинзбурга «Распространение электромагнитных волн в плазме». По многим причинам извлекать информацию о магнитных полях галактик из данных по фарадеевским вращениям синхротронного излучения гораздо труднее, чем делать аналогичную работу в сахарной промышленности. Методы интерпретации фарадеевских вращений прошли за почти полвека путь от первых успешных попыток их применения до современных изощренных методов.

**Ключевые слова:** радиоастрономия, поляризованное радиоизлучение, галактики, эффект Фарадея.

***Дмитрий Дмитриевич Соколов**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — электродинамика космических сред, физика случайных сред, геометрические методы в физике. Член редколлегии журнала «Природа».*

Чуть больше столетия назад, в 1908 г., американский астроном Джордж Хейл впервые измерил расщепление спектральных линий в излучении, приходящем от солнечных пятен, и таким образом оценил магнитное поле в пятнах [1]. Оно оказалось большим, около 1 кГс (для астрономов неактуально различие между напряженностью магнитного поля и его индукцией, поэтому они отказываются пользоваться эрстедами и измеряют магнитное поле в гауссах). Так магнитные поля вошли в астрономию. На вопрос о том, как измеряются магнитные поля в астрономии, хороший студент должен уверенно отвечать: «По эффекту Зеемана!» (Плохой студент, естественно, этого не знает.)

© Соколов Д.Д., 2017

Этот стандартный ответ не относится, однако, к магнитным полям галактик (см. например, [2]). Дело в том, что в мире галактик приходится сталкиваться с иными порядками величин, чем в звездной (и солнечной) астрономии. Магнитные поля галактик (прежде всего — спиральных) на много порядков слабее, чем магнитные поля в солнечных пятнах. Вместо килогауссов речь теперь идет

о единицах микрогауссов. Это совсем не значит, что галактические магнитные поля слабы и неинтересны — там действуют явления совсем других масштабов, чем на Солнце. Оказывается, плотность энергии магнитных полей галактик сопоставима с плотностью кинетической энергии межзвездной среды, т.е. они способны, как и магнитное поле Солнца, влиять на динамику среды. С другой стороны, пространственный масштаб магнитных полей галактик на много порядков больше масштаба звездных магнитных полей и сопоставим с 10 кпк.

Магнитные поля галактик интересны, конечно, и сами по себе: спиральные галактики оказываются самыми большими известными нам магнитами*. Кроме того, эти поля объясняют интересные процессы в галактиках — например, по структуре магнитного поля в галактике с перемычкой видно, что оно помогает питать веществом ее центральную черную дыру [3], рис.1.

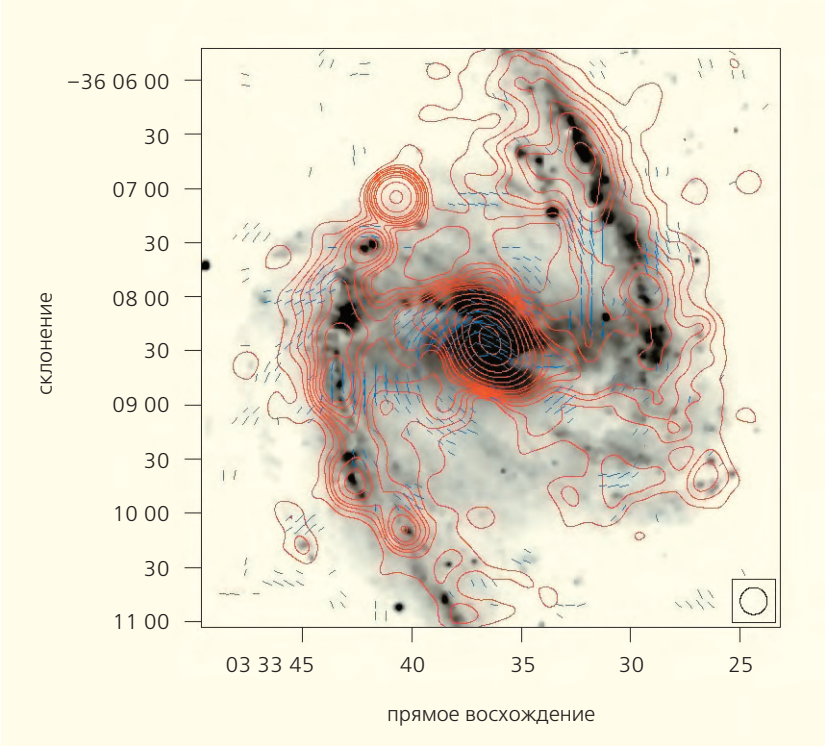



Рис.1. Магнитное поле в галактике с перемычкой NGC 1365. Контурными линиями показана интенсивность поляризованного излучения по наблюдениям на длине волны 6.2 см. Черточки изображают направление магнитного вектора, восстановленное по положению плоскости поляризации. Чтобы поставить на этих черточках стрелки, обозначающие направление вектора «влево-вправо», требуется дополнительная и непростая работа. Рисунок Р.Бека наложен им же на оптическое изображение галактики, полученное на телескопе «Хаббл». Перемычка галактики идет из нижнего левого в верхний правый угол. Вещество стекается вдоль магнитных линий в перемычке в центр галактики и питает расположенную там черную дыру.

## Эстафета от Фарадея к Гинзбургу

В то, что астрономы уверенно измеряют магнитные поля галактик, большой вклад внес Виталий Лазаревич Гинзбург, хотя изучение магнитных полей галактик и не принадлежало, быть может, к его излюбленным темам. Дело в том, что центральную роль в измерении магнитных полей галактик играет эффект Фарадея. Кое-что можно узнать и из зеемановских наблюдений, однако эффекту Зеемана (расщепление спектральных линий в магнитном поле из-за разбивки энергетических уровней атома на подуровни) приходится конкурировать с эффектом Доплера (уширение спектральных линий из-за случайных движений среды). Магнитное поле в галактиках намного меньше солнечного, а движения — очень интенсивные, поэтому заметить эффект Зеемана удается лишь в сравнительно редких случаях (например, в плотных облаках галактического газа). Полезны и другие наблюдения. Первым о существовании магнитного поля Млечного Пути, галактики, в которой мы живем, догадался в начале 50-х годов XX в. Энрико Ферми, изучая распространение космических лучей (это тоже тема, очень близкая Виталию Лазаревичу). Тем не менее, все эти источники информации несопоставимы по своей ценности с тем, что дает эффект Фарадея.

Эффект Фарадея был, естественно, известен с XIX в. и говорил о том, как в оптически активных (для нас лучше сказать «зеркально асимметричных») средах происходит вращение плоскости поляризации электромагнитных волн (плоскости, проходящей через направление распространения волны и вектор напряженности электрического поля **E**), рис.2. При этом термин «оптически активная среда» читался как «раствор сахара». Об этом эффекте и его применениях в сахариметрии пишут, например, знаменитый дореволюционный Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона и Большая советская энциклопедия**.

* Подробнее см.: *Соколов Д.Д.* Самые большие магниты // Природа. 2015. №7. С.3–11.

** Сахар // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: В 86 т. СПб., 1890–1907; Сахариметрия // Большая советская энциклопедия: В 30 т. / Гл. ред. А.М.Прохоров. 3-е изд. М., 1969–1978.

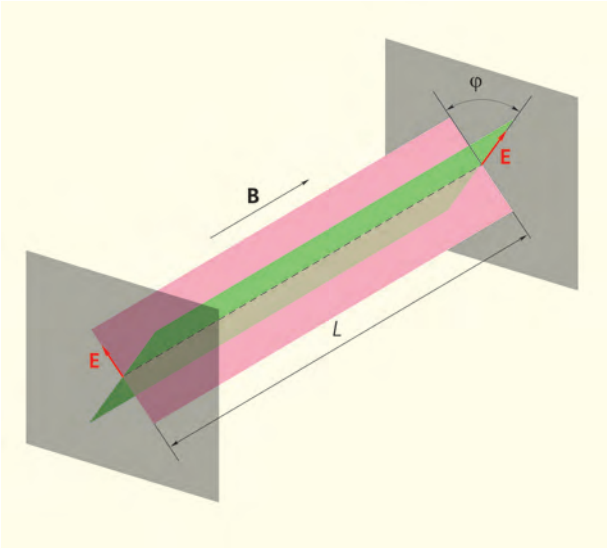



Рис.2. Схема эффекта Фарадея (обозначения см. в тексте).

Суть метода связана с тем, что молекулы сахара в принципе могут иметь две пространственные конфигурации, одна из которых получается из другой отражением в зеркале. Однако реально в биологические процессы, в частности те, где сахар образуется, вовлечены молекулы лишь одной конфигурации. Поэтому раствор сахара представляет собой зеркально-асимметричную среду, в которой и происходит вращение плоскости поляризации. Необходимость бороться с махинациями нечестных производителей сахара не вызывает сомнения (для контроля его качества, т.е. степени очистки, и нужна прежде всего сахариметрия — по углу вращения судят о концентрации активного вещества в растворе), но на первый взгляд неясно, как эта борьба связана с магнитными полями галактик. Впрочем, здесь, быть может, видна ограниченность взгляда физика — хорошо помню, что, когда еще не было Интернета и оттиски научных статей распространялись по почте, основная масса запросов о статьях по магнитным полям галактик приходила из биологических организаций типа Каирского зоопарка.

Огромная заслуга В.Л.Гинзбурга состоит в том, что он ясно осознал и довел до сведения научной общественности в своей книге «Распространение электромагнитных волн в плазме» (русское издание вышло в 1960 г., английское — в 1970 г. [4]) тот факт, что замагниченная (астрономы предпочитают говорить так, а не употреблять слово «намагниченная» — этим подчеркивается, что магнитное поле возникает не на атомном уровне, а в результате действия электромагнитной индукции в среде) плазма тоже является зеркально-асимметричной средой. В принципе это становится очевидным сразу после того, как вопрос хорошо сформулирован. В самом деле, магнитное поле — не обыкновенный вектор, а псевдовектор. Это значит, что для определения направления магнитного поля нужно владеть различием между правым и левым — либо знать, какая рука у человека левая, либо обратиться к тому, закрученные в какую сторону штопоры продаются в магазинах. Определение направления электрического поля (и других обычных векторов) таких знаний не требует. Поэтому магнитное поле нарушает зеркальную симметрию среды и может приводить к эффекту Фарадея. Количественно этот эффект описывается углом поворота плоскости поляризации φ, который в простейшем случае пропорционален произведению компоненты магнитного поля вдоль луча зрения $B_l$, длине пути луча зрения в среде $L$ и плотности тепловых (нерелятивистских) электронов $n$, а также квадрату длины волны электромагнитного излучения λ. В случае изменяющихся по пути магнитного поля и электронной плотности приходится прибегать к интегрированию:

$$\varphi = \lambda^2 \frac{e^2}{2\pi (mc)^2} \int_0^L B_l n dl, \quad (1)$$

где $m$ — масса электрона, $c$ — скорость света. Обратим внимание, что в астрономии принято считать положительным направление магнитного поля от наблюдателя, а интегрирование в формуле (1) ведется от источника к наблюдателю. В сахаримериии, напротив, предполагается, что наблюдатель расположен там же, где источник. Многие астрономы были бы счастливы хоть ненадолго побывать там, где формируется космическое излучение, но эта мечта остается нереализуемой в обозримом будущем.

Произведение трех величин объединяется в величину, которая называется по-русски мерой фарадеевского вращения, но обозначается $RM$, от английского rotation measure (Фарадей был скромным человеком):

$$RM\ (\text{рад/м}^2) = 0.81 n\ (\text{см}^{-3}) \cdot B_l\ (\text{мкГс}) \cdot L\ (\text{пк}). \quad (2)$$

Формула (2) переписана в тех единицах, которые используются на практике. В них электронная плотность и магнитное поле нормированы так, что в дисках спиральных галактик две первые дроби чуть больше единицы, а типичная толщина замагниченного галактического диска сопоставима с 1 кпк. В итоге $RM$ обычно оказывается порядка 100 радиан на квадратный метр (углы можно, конечно, измерять и в градусах, но здесь в радианах удобнее).

Все это очень ясно прослеживается в книге Виталия Лазаревича. Поколения исследователей изучали и изучают эффект Фарадея (а также многое другое) по его книге (замечательная реферативная система Astronomical Data System насчитывает 614 ссылок на английское издание, причем восемь за первые четыре месяца этого года — это очень немало для данной области науки). Ясность мысли — замечательное и редкое свойство, которым обладал Виталий Лазаревич!

В эффекте Фарадея очень важно то, что поворот плоскости поляризации пропорционален длине пути $L$ света в магнитном поле. Это значит, что при изучении магнитных галактик можно компенсировать небольшую напряженность магнитного поля огромными размерами галактик. Формула для эффекта Зеемана не содержит $L$, поэтому огромные размеры галактик использовать не удается.

В сахариметрии экспериментатор сам задает начальное положение плоскости поляризации. Поэтому для измерения угла ее поворота достаточно поляризованного излучения с одной фиксированной длиной волны. При изучении магнитных полей галактик приходится использовать две длины волны и предполагать, что излучение на обеих длинах волн связано с одним и тем же физическим механизмом — как правило, это синхротронное излучение. Тогда, сопоставляя положения плоскости поляризации для двух длин волн, можно найти и меру фарадеевского вращения, и начальное положение плоскости поляризации.

На самом деле измерение «космического» фарадеевского вращения — очень сложная и трудоемкая процедура. Приходится учитывать и компенсировать много мешающих эффектов, например, фарадеевское вращение в ионосфере Земли. Необходимо также проверять, действительно ли поляризованное излучение на разных длинах волн исходно имело одно и то же положение плоскости поляризации. Простейшая проверка этого требует наблюдений на трех длинах волн, из которых можно составить две пары и убедиться, что сопоставление положений плоскостей поляризаций для обоих пар приводит к одной и той же (в пределах погрешностей измерений) оценке меры фарадеевского вращения. Наконец, само измерение угла поворота плоскости поляризации для используемого излучения из радиодиапазона (о выборе подходящих длин волн речь пойдет чуть ниже) сложнее, чем в оптике — вместо аналоговых методов (компенсации эффекта с помощью привычной поляризационной призмы) здесь используют цифровые. И напомним, что когда магнитное поле и распределение электронной плотности непостоянны вдоль луча зрения, вместо простого произведения $B_l L$ мера фарадеевского вращения определяется соответствующим интегралом.

## Измерительная кухня

Опираясь на книгу Гинзбурга и представляя, о каких масштабах величин идет речь, можно оценить, в каком диапазоне естественно наблюдать магнитные поля галактик. В самом деле, поворот плоскости поляризации должен быть не очень маленьким, хорошо бы градусов 10 (чтобы его можно было легко измерить), но и не слишком большим. Дело в том, что положение плоскости поляризации определено с точностью до прибавления или вычитания 180 градусов. Если плоскость повернулась больше, чем на 180°, об этом приходится догадываться, сопоставляя наблюдения на близких длинах волн, что представляет собой очень непростое занятие. Поскольку о том, какова напряженность магнитного поля в галактиках, догадался Ферми, а произведение длины и электронной плотности (так называемая дисперсионная мера) известно по наблюдениям пульсаров (это отдельная история), нетрудно оценить и тот диапазон длин волн, в которых нужно вести наблюдения магнитных полей галактик. Простое вычисление показывает, что оптимальным оказывается диапазон длин волн от примерно 3 см до чуть более 20 см — классический диапазон радиоастрономии. На более длинных волнах плоскость поляризации поворачивается больше одного раза, а на волне 3 см поворотом плоскости поляризации обычно уже можно пренебречь и найти таким образом начальное ее положение.

Все эти рассуждения молчаливо предполагают, что источник излучения отделен от среды, в которой происходит фарадеевское вращение. Излучение образуется где-то далеко за слоем замагниченной плазмы, которая только вращает плоскость поляризации — такой слой называется фарадеевским экраном. В этой картине есть определенное внутреннее противоречие. Синхротронное излучение образуется в замагниченной среде. Если в источнике излучения есть и тепловые электроны — а они часто там есть, — то фарадеевское вращение происходит не только в экране, но и в источнике. Тем не менее существуют такие источники синхротронного излучения — тут годятся пульсары и разнообразные дискретные внегалактические источники, — в которых на представляющих интерес радиочастотах собственное фарадеевское вращение источника мало. Так уже в 70-е годы прошлого века удалось много узнать о строении магнитного поля Млечного Пути, а со временем и подобрать подходящие источники, которые просвечивают разнообразные внешние галактики.

Но магистральный путь исследования магнитных полей спиральных галактик пролегал через анализ фарадеевского вращения излучения, которое возникает в самой изучаемой галактике. В этом случае связь между магнитным полем и поворотом плоскости поляризации намного сложнее, чем для фарадеевского экрана. Теория измерения магнитного поля в излучающей и вращающей среде была развита в знаменитой работе Берна [5], которая отталкивалась от свойств фарадеевского экрана. Хотя статья Берна появилась в промежутке между русским и английским изданием книги Гинзбурга, ее стилистика совсем другая. В сущности, сейчас даже неизвестно, кем был автор, как его звали (сохранились лишь инициалы). Видимо, это аспирант, который написал одну фундаментальную статью, а потом еще несколько

хороших, но рядовых работ и навсегда ушел из науки. Статья получилась очень тяжелая. В ней опущены многие совершенно нетривиальные выкладки. Читая ее, все время думаешь, что автор наверняка потерял много красивых эффектов. Через много лет мне пришлось участвовать в написании развернутого комментария к статье Берна, в котором авторы подробно показывают, как заполняются многочисленные дыры в его рассуждениях, в чем состоит логика различных приближений. Наша статья с благодарностью цитируется многими исследователями, но оставляет у меня чувство огорчения — оказалось, что Берн нашел все полезные приближения и его формулы правильные (точнее, в одном месте он забыл не очень существенный множитель $\sqrt{2}$). Забавно, что в самой статье Берн обсуждает фарадеевское вращение дискретных радиоисточников, а не галактик, которые радиотелескоп пространственно разрешает. На адекватное понимание работы Берна ушло немало времени и усилий.

Первым выводом из теории Берна было то, что наблюдения нужно вести на таких длинах волн, на которых фарадеевское вращение еще невелико — угол поворота существенно меньше 180°. В таком случае говорят о фарадеевски тонком источнике (мы уже обсуждали это ограничение выше).

Практическое использование фарадеевского вращения для изучения магнитных полей галактик было сделано в огромной серии работ радиоастрономов Института радиоастрономии Общества имени Макса Планка в Бонне (Германия). На рубеже 80-х годов его тогдашний директор Рихард Вилебинский получил в свои руки замечательный радиотелескоп в Эффельсберге, недалеко от Бонна, рис.3. Нужно было найти прорывную тематику исследований. Первые наблюдения показали, что радиоизлучение близких спиральных галактик, прежде всего галактики M31 (туманности Андромеды), поляризовано. И до этого все думали, что в спиральных галактиках есть магнитное поле, но оно молчаливо предполагалось мел-

Рис.3. Вид радиотелескопа сильно зависит от его конструкции. На рисунке одновременно показана тарелка телескопа в Эффельсберге, а перед ней видны антенны находящейся там же станции телескопа LOFAR. Последний — интерферометр, он собирает сигнал со многих станций, расположенных в нескольких европейских странах, а центральное ядро телескопа находится в Голландии. На переднем плане мы видим автора снимка — одного из ведущих наблюдателей магнитных полей галактик Райнера Бека из Института радиоастрономии общества имени Макса Планка.

комасштабным. Наблюдение поляризации явно намекало на то, что пространственный масштаб магнитного поля сопоставим с размером самой галактики, поэтому сложение излучений от разных ее частей, приходящее в радиотелескоп, не приводит к его деполяризации. Конечно, это можно было бы предположить на основании имевшихся тогда знаний о магнитном поле Млечного Пути, но дали о себе знать научные предрассудки. По астрономической классификации изучение Млечного Пути и внешних галактик принадлежит разным областям науки, так что подобная мысль просто не приходила в голову.

Вилебинский удачно ориентировал работу своей группы на изучение поляризованного радиоизлучения и фарадеевского вращения спиральных галактик, и вскоре команда, в которую входили такие замечательные астрономы, как Райнер Бек, Элли Беркхаузен (рис.4), Марита Краузе, Вольфганг Райх и др., стала законодателем мод в наблюдениях магнитных полей спиральных галактик. Со временем наблюдения стали проводиться не только на радиотелескопе в Эффельсберге, но и на американском радиотелескопе VLA. Конструкция этих телескопов различна, поэтому особенно эффективно их совместное использование – так удается соединять их преимущества и подавлять недостатки.

Рис.4. Элли Беркхаузен — замечательный голландский астроном, сотрудник Института радиоастрономии в Бонне, один из пионеров наблюдений магнитных полей галактик.

## Плоды общих усилий

В это же время теоретическое изучение образования магнитных полей в различных небесных телах развивалось в нашей стране в группе Якова Борисовича Зельдовича. В 1983 г. вышла книга Я.Б.Зельдовича, А.А.Рузмайкина и Д.Д.Соколова «Магнитные поля в астрофизике». Сейчас трудно себе представить, что для известного академика, трижды Героя Социалистического Труда и одного из научных лидеров атомного проекта оказалось невозможным опубликовать эту книгу в своей стране. Она вышла по-английски в Нью-Йорке. Однако дело обстояло именно так. Бюрократические препоны оказались сильнее научного авторитета, поэтому книгу сначала читали и цитировали иностранные читатели, а к отечественным она пришла лишь через четверть века.

В этой книге магнитным полям внешних галактик посвящен один короткий раздел, в котором делается очевидное утверждение: странно было бы, если бы магнитное поле встречалось только в Млечном Пути и отсутствовало в других спиральных галактиках.

Через пять лет накопился материал на книгу [2], посвященную специально магнитным полям галактик. Мы выпустили ее в голландском издательстве Kluwer (в начале работы оно еще носило громкое имя «Дурнебаль Райдель»), но очень хотелось опубликовать ее и в издательстве «Наука». Было ясно, что Зельдович нам помочь не может, поэтому мы пошли в Гинзбургу, который с удовольствием послушал про фарадеевское вращение и сумел решить проблему.

В то время быстро укреплялись научные связи нашей страны с внешним миром. Мы быстро познакомились и подружились с нашими немецкими коллегами, а потом и с коллегами из других стран. Мир стал настолько тесен, что уже не всегда просто решить, какую страну представляет тот или иной специалист. Так или иначе, в 1996 г. вышел большой обзор по магнитным полям галактик, написанный содружеством лидирующих в этом вопросе специалистов [6]. До сих пор данный обзор остается стандартным источником знаний по магнитным полям галактик, хотя, конечно, с тех пор получено немало конкретных результатов в этой области.

Поначалу реальным было наблюдение поляризованного наблюдения на двух-трех, редко четырех-пяти длинах волн. Дело в том, что наблюдение на каждой длине волны требовало своего приемника, а набор приемников на каждом радиотелескопе был ограничен. Время идет — постепенно в радиоастрономию пришли широкополосные приемники радиоизлучения. Большой вклад в их внедрение внесли голландские радиоастрономы: Голландия по праву может называться еще одной великой державой радиоастрономии.

С помощью широкополосных приемников можно наблюдать угол поворота плоскости поляризации на большом, квазинепрерывном наборе длин волн. Реализовать эту техническую возможность не так просто — для наблюдения на 100 длинах волн (как говорят, в 100 каналах), нужно в 50 раз больше времени, чем для двух длин волн. А поговорка time is money вполне актуальна и в радиоастрономии — современные радиотелескопы стоят огромных денег, так что за наблюдательное время существует напряженная конкуренция. Поэтому нужно, чтобы проводимые работы обещали что-то очень важное.

Еще одна характерная черта современного этапа развития фарадеевских наблюдений состоит в том, что на смену классическим VLA и телескопу в Эффельсберге приходит новое поколение радиотелескопов. Один из них — LOFAR (Low frequency array) — прямо своим названием указывает на то, что наблюдения ведутся на длинах волн, для которых галактики обычно оказываются фарадеевски толстыми. Быть может, этот выбор волнового диапазона и не кажется оптимальным с точки зрения изучения магнитных полей галактик, но большие новые инструменты редко строят под один класс задач. Поэтому приходится предлагать методы, вписывающиеся в существующие условия.

Один из этих новых методов получил название фарадеевского синтеза ([7], а о перспективах применения этого метода специально для магнитных полей галактик см., например, [8]). Он связан с новым прочтением одной из формул в статье Берна. Оказывается, что задачу об определении строения магнитного поля галактик (и других подобных объектов) можно переформулировать как задачу об определении того, какой поток поляризованного излучения идет от части источника, для которого величина $B_{\parallel}nL$ равна заданному значению. Этот подход родился в Голландии. Он кажется многообещающим – появляется новое измерение в том наборе данных, которым характеризуется магнитное поле. Несколько групп во всем мире упорно ищут, как эффективно использовать эту идею. Не всегда находки кажутся убедительными, но постепенно метод совершенствуется. Отечественные исследователи тоже принимают участие в этой работе. Посмотрим, к чему она приведет в недалеком будущем. ■

## Литература / References


1. *Hale G.E.* On the probable existence of a magnetic field in Sun-spots. Astrophys. J. 1908; 28: 315–343.
2. *Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д., Шукуров А.М.* Магнитные поля галактик. М., 1988. [*Ruzmaikin A.A., Shukurov A.M., Sokoloff D.D.* Magnetic Fields of Galaxies. Dordrecht, 1988.]
3. *Ehle M., Beck R., A.Shukurov A. et al.* Magnetfelder füttern Schwarzes Loch. Sterne und Weltraum. 1999; B6(7): 434–453.
4. *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. М., 1960. [*Ginzburg V.L.* The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas. Oxford, 1970.]
5. *Burn B.J.* On the depolarization of discrete radio sources by Faraday dispersion. Mon. Not. Roy. Astron. Sc. 1966; 133: 67–83.
6. *Beck R., Brandenburg A., D.Moss et al.* Galactic magnetism: recent developments and perspectives. Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1996; 34: 155–206.
7. *Brentjens M.A., Bruyn de A.G.* Faraday rotation measure synthesis. Astron. Astrophys. 2005; 441: 1217–1228.
8. *Frick P., Stepanov R., Sokoloff D., Beck R.* Faraday rotation measure synthesis for magnetic fields of galaxies. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2011; 414: 2540–2549.


## Measuring galactic magnetic fields: From Ginzburg's book up to Faraday synthesis


D.D.Sokoloff
*Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)*



A century ago, American astronomer G.Hale first measured splitting of spectral line in sunspot radiation. It was first measurement of solar magnetic fields. Zeeman effect is useful for magnetic field measurements in various stars, however this method is much less helpful for galactic magnetic fields because these fields are much weaker than solar and stellar ones. Magnetic fields of galaxies are measured in the first line using Faraday effect, i.e. rotation of polarization plane in optically active media. Faraday effect is exploited in sugar production to measure the sugar concentration in sugar containing solutions. Molecule of sugar has two versions mirror symmetric, one in respect to the other, and only one of these configurations is producing in biological processes. It is why the sugar containing solution is a mirror asymmetric medium. Polarization plane rotates in propagation of polarized radiation through such a medium. Magnetized plasma is a mirror asymmetric medium as well and do rotates polarization plane of a radiation propagating through such medium. The rotation is proportional to the depth of the magnetized layer. It gives an opportunity to use huge spatial scale of galaxies. A crucial role in establishing the Faraday effect as a leading method for investigation of galactic magnetic fields played the famous book by V.L.Ginzburg "The propagation of electromagnetic waves in plasmas". Of course, it is much more difficult to extract information from the Faraday rotation measures for galaxies rather to do similar job in the sugar industry. The methods for interpretation of the Faraday rotation data in galactic magnetic field studies developed from the first successful attempts of their application a century ago up to contemporary sophisticated methods.



**Keywords:** radioastronomy, polarized radioradiation, galaxies, Faraday effect.

# Физика взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма

А.И.Буздин[1], А.С.Мельников[2]
[1]*Университет Бордо (Бордо, Франция)*
[2]*Институт физики микроструктур РАН (Нижний Новгород, Россия)*

В последние годы активно развивается направление физики сверхпроводимости, связанное с экспериментальными и теоретическими работами по исследованию взаимодействия сверхпроводящего и магнитного упорядочений в различных системах. Оригинальные идеи по этой проблеме были высказаны В.Л.Гинзбургом в одной из его пионерных работ в 50-х годах прошедшего века. Электродинамический и обменный механизмы взаимодействия магнетизма и сверхпроводимости приводят к новым интересным эффектам в естественных ферромагнитных сверхпроводниках и искусственных гибридных структурах. Присутствие доменной структуры в ферромагнетике существенно модифицирует структуру сверхпроводящего состояния. Интерес к таким системам вызван как очевидной важностью фундаментальной проблемы конкуренции различных типов упорядочения в физике конденсированных сред, так и возможностью использования гибридных структур сверхпроводник—ферромагнетик для создания прототипов устройств сверхпроводящей спинтроники, таких как спиновые вентили, сверхпроводящие каналы управляемой геометрии или джозефсоновские контакты со спонтанной разностью сверхпроводящих фаз. Идея использования данных структур для элементной базы криоэлектроники заключается в возможности управления критической температурой сверхпроводящего перехода и сверхпроводящими токами путем изменения магнитного состояния ферромагнитной подсистемы.

**Ключевые слова:** сверхпроводимость, ферромагнетизм, спинтроника, куперовские пары, обменное поле.

Впервые проблема сосуществования сверхпроводимости и магнетизма была теоретически сформулирована в статье В.Л.Гинзбурга в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» в 1956 г. [1]. Взаимный антагонизм этих двух явлений очевидным образом следует уже из фундаментального свойства сверхпроводящего состояния металлов, получившего название эффекта Мейсснера, — способности выталкивать магнитное поле. Незатухающие токи сверхпроводящих электронов, которые отвечают при этом за экранировку внешних магнитных полей, в свою очередь, оказывают разрушающее влияние на саму сверхпроводимость: она исчезает при превышении некоторого критического значения приложенного магнитного поля. Любой магнитный материал представляет собой естест-

***Александр Иванович Буздин,*** *доктор физико-математических наук, профессор Университета Бордо (Франция). Занимается теорией сверхпроводимости, магнетизма, гетероструктур. Лауреат франко-английской премии Холвека (Holweck Prize and a gold medal, 2013), иностранный член Академии Ломбардии (Италия), кавалер французского Ордена Академических пальм (Ordre des Palmes académiques) — за заслуги в образовании и науке.*

***Александр Сергеевич Мельников,*** *доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией теории мезоскопических систем Института физики микроструктур РАН (Нижний Новгород). Область научных интересов — сверхпроводимость, квантовый транспорт, мезоскопика.*

© Буздин А.И., Мельников А.С., 2017

венный источник магнитных полей, которые должны, таким образом, разрушать сверхтекучее состояние электронов в материале. Приведенные аргументы иллюстрируют так называемый электромагнитный (или орбитальный) механизм конкуренции сверхпроводимости и магнетизма. Такое соперничество должно существенно затруднить одновременное сосуществование этих явлений в естественных материалах или искусственных структурах. В работе В.Л.Гинзбурга была подробно проанализирована лондоновская электродинамика ферромагнитного сверхпроводника, рассчитано распределение сверхпроводящих токов, компенсирующих токи намагниченности, построены фазовые диаграммы ферромагнитных сверхпроводников во внешних полях.

При всей широте научных интересов Виталия Лазаревича тема сверхпроводимости была у него на особом счету (Нобелевскую премию он получил именно за работы по созданию феноменологической теории сверхпроводимости), поэтому полезно провести краткий обзор развития идей, высказанных Гинзбургом в одной из его пионерных работ, и взглянуть на современное состояние этой области физики.

## Магнитные сверхпроводники

Первое важное замечание, которое следует сделать, чтобы лучше понять взаимодействие магнетизма и сверхпроводимости, связано с тем, что электродинамический механизм такого взаимодействия отнюдь не является единственным, хотя и доминирует во многих случаях. Дело в том, что упорядочение магнитного момента в ферромагнетиках приводит к появлению дополнительного весьма сильного поля, действующего на собственные магнитные моменты электронов проводимости, наличие которых обусловлено существованием спина у электрона. Это поле, действующее со стороны магнитных атомов, имеет существенно квантово-механическую природу и называется обменным полем. Соответствующая величина обменного взаимодействия в градусах (по шкале Кельвина) составляет 100–1000 К, что превосходит критическую температуру сверхпроводников. Указанное обстоятельство имеет весьма драматические последствия с точки зрения возникновения сверхпроводящего состояния магнитных металлов. Проблема здесь заключается в том, что в большинстве стандартных сценариев появление сверхпроводимости обусловлено формированием связанных пар электронов (куперовских пар), имеющих противоположные направления спинов. Обменное же поле магнитных атомов стремится упорядочить спины электронов, разрушая тем самым куперовские пары.

Этот феномен объясняет, почему среди открытых в 80-х годах прошлого века первых магнитных сверхпроводников не было ферромагнетиков [2, 3, 4]. Большинство этих соединений типа $RRh_4B_4$ и $RMo_6S_8$, где R — редкоземельный атом, оказались антиферромагнитными сверхпроводниками. По мере понижения температуры они переходят в сверхпроводящее состояние, а затем в них появляется антиферромагнитное упорядочение магнитных моментов атомов R. В антиферромагнетике средние (на дистанциях порядка размера куперовской пары) обменное и орбитальное поля обращаются в ноль, и в результате антиферромагнетизм может спокойно сосуществовать со сверхпроводимостью. В свою очередь, сверхпроводимость также практически никак не влияет на антиферромагнетизм.

Не так давно (в конце 90-х) был открыт другой класс антиферромагнитных сверхпроводников: $RNi_2B_2C$. Весьма необычная, возвратная, сверхпроводимость была обнаружена в соединениях $ErRh_4B_4$ и $HoMo_6S_8$. Эти материалы при низких температурах — ферромагнитные нормальные металлы. Их температура Кюри (критическая температура, при которой происходит ферромагнитный фазовый переход) весьма низка, и вначале при понижении температуры они, еще не успев приобрести магнитный порядок, переходят в сверхпроводящее состояние. При дальнейшем охлаждении в них вместо ферромагнетизма возникает неоднородное магнитное упорядочение с периодом около сотни ангстремов. Температурный интервал сосуществования этого неоднородного магнетизма и сверхпроводимости невелик (0.05–0.1 К), и при дальнейшем понижении температуры сверхпроводимость разрушается, а неоднородный магнитный порядок превращается в обычный ферромагнитный. Именно из-за разрушения сверхпроводимости при охлаждении ее в данном случае назвали возвратной. Возникновение неоднородного магнетизма вместо ферромагнетизма было предсказано в работе П.Андерсона и Х.Сула [5]. Возможность формирования неоднородного магнитного состояния связана по сути с существенной разницей между характерными масштабами магнетизма и сверхпроводимости. Действительно, размер куперовской пары (длина когерентности) способен на несколько порядков превышать атомарный масштаб (характерный масштаб для магнитного упорядочения). В результате может возникнуть компромиссная ситуация: энергетически выгодным оказывается состояние с неоднородным магнитным моментом, причем масштаб его неоднородности существенно превышает атомный (в этом плане нет противоречия тенденции к ферромагнитному упорядочению), но в то же время мал по сравнению со сверхпроводящей длиной когерентности (что приводит к эффективному усреднению неоднородного обменного поля на размере куперовской пары).

Первые истинно ферромагнитные сверхпроводники были открыты сравнительно недавно [6–8]: это соединения $UGe_2$ (2000 г.), URhGe (2001 г.)

и UCoGe (2007 г.). Профессиональный обзор по свойствам этих соединений можно найти в [9]. Магнитный переход в них обусловлен ферромагнитным упорядочением моментов атомов урана U. В первом из этих соединений сверхпроводимость возникает при внешних давлениях $p$ = = 10–15 кбар с максимальной критической температурой $T_c$ лишь около 0.7 К, однако температура Кюри при этом сравнительно высока: $\Theta$ ~ 10–30 К. В URhGe сверхпроводимость существует уже без давления, $T_c$ = 0.3 К, а $\Theta$ ~ 10 К. Для UCoGe мы имеем $\Theta$ = 3 К, $T_c$ = 0.8 К. При таких высоких значениях температуры Кюри наличие сверхпроводящего перехода означает, что куперовские пары должны быть триплетными, т.е. иметь сонаправленные спины электронов в паре. Таким образом, эти ферромагнитные сверхпроводники представляют собой весьма редкий пример триплетной сверхпроводимости. Подтверждением тому служит и сильная чувствительность критической температуры к чистоте кристаллов. Совсем недавно появился новый класс ферромагнитных сверхпроводников $EuFe_2(As_{1-x}P_x)_2$ с критическими температурами $T_c$ = 22 К и $\Theta$ = 17.7 К, для которых удалось получить весьма впечатляющие экспериментальные данные по визуализации распределения магнитного потока в доменной структуре [10]. Подводя итог данного раздела, можно констатировать: ферромагнитные сверхпроводники позволяют сочетать магнитные и сверхпроводящие свойства в одном соединении, что открывает интересные перспективы для их применений. Замечательные теоретические и экспериментальные успехи в этой области безусловно стали развитием изначального соображения Гинзбурга о конкуренции магнетизма и сверхпроводимости за счет чисто электромагнитного механизма (взаимодействия через индуцированные ферромагнитным порядком экранирующие сверхтекучие токи).

## Гибридные структуры: электромагнитный механизм

Следует все же отметить, что в плане приложений значительно больший интерес вызывает конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в так называемых гибридных структурах, т.е. системах, изготовленных из комбинаций магнитных и сверхпроводящих материалов, которые разделены изоляционными или проводящими прослойками. Идея использования данных структур для элементной базы криоэлектроники заключается в возможности управления сверхпроводящими токами путем изменения магнитного состояния ферромагнитной подсистемы. Безусловно, такой способ управления подразумевает использование достаточно слабых управляющих магнитных полей, приложенных к системе. Успехи современной технологии (напылительной техники и литографии) позволили экспериментаторам и технологам изготовить и исследовать весьма обширный класс обсуждаемых структур. Более того, в последнее десятилетие поток работ в данном направлении неуклонно возрастает, открывая вполне реальные перспективы для создания прототипов элементов так называемой сверхпроводящей спинтроники. Несмотря на необходимость очень низких температур для работы подобных устройств, использование их может быть вполне целесообразно, поскольку позволяет существенно снизить диссипативные потери, влияющие на функционирование элементов обычной (несверхпроводящей) спинтроники [11].

Начнем краткое обсуждение физики гибридных структур сверхпроводник—ферромагнетик с класса систем, в которых взаимодействие сверхпроводящих электронов и магнитных атомов происходит исключительно за счет электромагнитного механизма (по сути, за счет эффекта, предсказанного Гинзбургом, и заключающегося в том, что магнитное упорядочение индуцирует сверхтекучие токи в системе). На рис.1 изображены примеры таких систем: слоистые структуры и наноструктурированные системы магнитных точек на сверхпроводящей пленке. Исключение обменного механизма взаимодействия подразумевает отсутствие перехода электронов между сверхпроводящей и ферромагнитной подсистемами — это может быть обеспечено использованием либо ферромагнитных изоляторов, либо изоляционных барьеров, разделяющих подсистемы. Полезно отметить, что управляющие магнитные поля не приводят к переориентации магнитного момента ферромагнитной пленки как целого: реальная ферромагнитная подсистема характеризуется, как правило, неоднородным распределением намагниченности, т.е. разби-

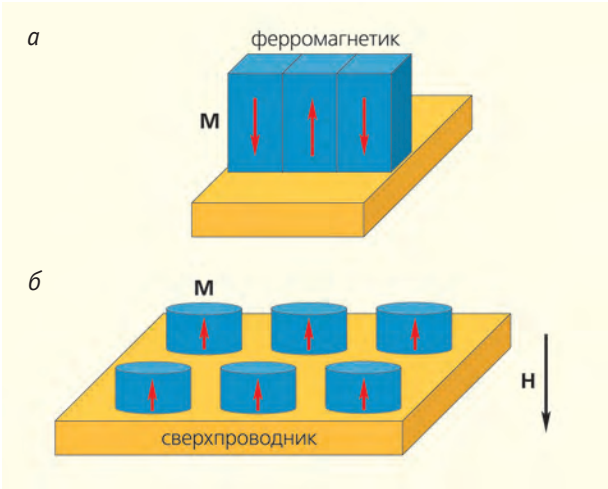



Рис.1. Примеры гибридных систем сверхпроводник—ферромагнетик: слоистые системы с доменной структурой ферромагнетика (*а*) и наноструктурированные системы магнитных точек на сверхпроводящей пленке (*б*). Красные стрелки показывают направление намагниченности.

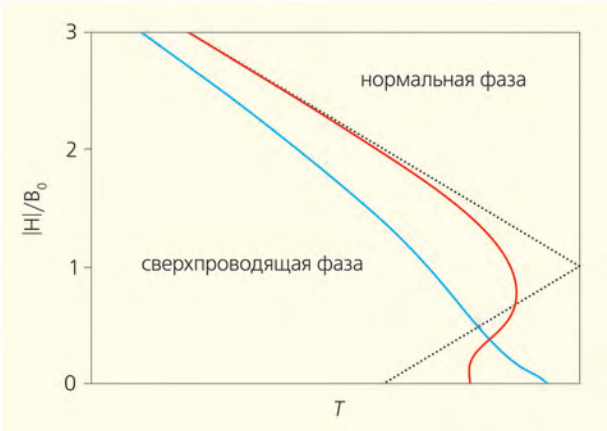



Рис.2. Типичная фазовая диаграмма бислоев сверхпроводник—ферромагнетик для большого (красная линия) и малого (синяя линия) периодов доменной структуры.

та на магнитные домены. В простейшей ситуации магнитные моменты соседних доменов могут быть противонаправлены (см. рис.1,*а*). Магнитные поля, индуцированные в сверхпроводящей пленке такой доменной структурой, оказываются сильно неоднородными, и, соответственно, плотность сверхпроводящих куперовских пар получается также сильно неоднородной. В зависимости от геометрии доменной структуры концентрация сверхпроводящих носителей может быть больше вблизи границ доменов — это явление получило название доменной сверхпроводимости [12, 13]. Протяженная доменная стенка, таким образом, может приводить к возникновению сверхпроводящего канала в образце. Положение такого канала и его свойства перестраиваются путем изменения геометрии доменной структуры под действием внешнего магнитного поля. Типичная фазовая диаграмма бислоев сверхпроводник—ферромагнетик приведена на рис.2. Подробный профессиональный обзор экспериментальных и теоретических работ по явлению доменной сверхпроводимости и сопутствующим эффектам можно найти, например, в [14]. В заключение этого раздела заметим, что многослойные структуры типа сверхпроводник—ферромагнетик обладают также весьма нетривиальным электромагнитным откликом и в этом плане могут рассматриваться как новый тип сверхпроводящих метаматериалов.

## Гибридные структуры: обменный механизм

Совершенно новая интересная физика возникает, когда мы рассматриваем структуры сверхпроводник—ферромагнетик с возможными переходами электронов между подсистемами. Проникая в ферромагнетик, куперовские пары испытывают воздействие обменного поля, которое стремится разрушить связанное состояние двух электронов. Это обстоятельство очевидно приводит к затуханию сверхпроводящих корреляций в ферромагнетике, происходящему на масштабах порядка нескольких нанометров. Новым эффектом здесь оказывается возникновение квантово-механической интерференции специального типа, которая отвечает за осцилляционное поведение волновой функции куперовской пары. Пространственный масштаб осцилляций оказывается порядка длины затухания волновой функции (рис.3). Ярким измеримым следствием данного интерференционного эффекта становится возникновение спонтанной разности фаз между комплексными волновыми функциями сверхпроводников, находящихся в контакте через ферромагнитную прослойку определенной толщины. Данная система — частный случай так называемого джозефсоновского контакта — стала важным элементом различных криоэлектронных схем. Будучи включенным в замкнутую сверхпроводящую цепь, контакт со спонтанной разностью сверхпроводящих фаз возбуждает спонтанный незатухающий ток в замкнутой цепи. Существование такого контакта со спонтанной разностью фаз было предсказано теоретически в работах [15, 16] и продемонстрировано экспериментально в группе В.В.Рязанова из Института физики твердого тела РАН (Черноголовка) в начале 2000-х годов [17]. В качестве ферромагнитной прослойки при этом использовались сплавы типа CuNi, которые позволяют увеличить масштабы затухания и осцилляций волновой функции сверхпроводящих носителей заряда.

Неоднородное сверхпроводящее состояние, которое возникает в контактах сверхпроводник—ферромагнетик—сверхпроводник, может быть объяснено как следствие более общего механизма, обусловленного воздействием обменного поля на спины электронов. Речь идет о механизме Ларкина—Овчинникова—Фульде—Феррелла. Это явление удобно проиллюстрировать с помощью рис.4.

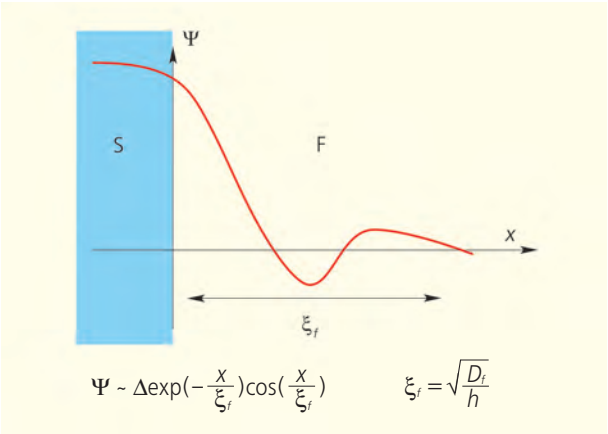



Рис.3. Затухание и осцилляции волновой функции куперовских пар вблизи границы сверхпроводник (S) — ферромагнетик (F).

За счет обменного взаимодействия для электронов с противоположными спинами поверхности Ферми* оказываются различными. Из рисунка ясно следует, что расщепление поверхностей Ферми в импульсном пространстве порождает появление ненулевого суммарного импульса у куперовской пары. Этот суммарный импульс и приводит по существу к искомой неоднородности волновой функции куперовской пары, т.е. к ее осцилляционному поведению в ферромагнетике.

Интерференционные явления в квантовой механике куперовских пар становятся еще более нетривиальными в присутствии неоднородных обменных полей [18, 19]. Такая неоднородность может либо возникать естественным образом при разбиении ферромагнитной подсистемы на домены, либо создаваться и контролироваться искусственно в системах, содержащих несколько последовательных ферромагнитных слоев с различной ориентацией вектора намагниченности (рис.5,*а*). Если теперь намагниченность в одном из слоев будет пиннинговаться (закрепляться), например, с помощью дополнительного антиферромагнитного слоя, возникает возможность управления взаимной ориентацией векторов намагниченности в соседних ферромагнитных пленках при приложении сравнительно слабых магнитных полей. Изменение профиля обменного поля вблизи поверхности сверхпроводника оказывает сильное влияние на проникновение куперовских пар в ферромагнитную подсистему и, соответственно, смещает критическую температуру сверхпроводящего перехода во всей системе. В результате температурная зависимость сопротивления сдвигается (рис.5,*б*), и мы получаем возможность эффективного управления сопротивлением образца в слабых магнитных полях. Такая структура получила название спинового вентиля; ее тоже можно отнести к перспективным элементам будущих криоэлектронных схем. К сожалению, сдвиг критической температуры для большинства ферромагнитных металлов оказывается крайне малым (порядка долей градуса), однако величина сдвига существенно возрастает при использовании металлов с сильной спиновой поляризацией носителей заряда (когда в зоне проводимости присутствуют электроны только с одним направлением спина). Неоднородный профиль обменного поля дает возможность наблюдения еще одного интересного и важного физического эффекта: такое обменное поле может не только разрушать куперовские пары с противоположным направлением спинов своих электронов, но и вызывать образование проникающих на большое расстояние от границы сверхпроводника куперовских пар с одинаковым направлением спина (уже упоминавшихся триплетных сверхпроводящих корреляций). Такие дальние сверхпроводящие корреляции успешно наблюдались в ряде экспериментов.

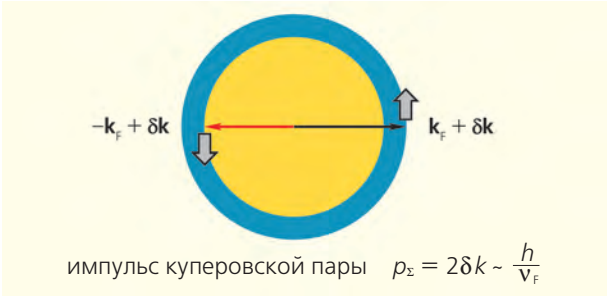



Рис.4. Расщепление поверхностей Ферми в импульсном пространстве и появление ненулевого импульса куперовской пары под действием обменного поля.

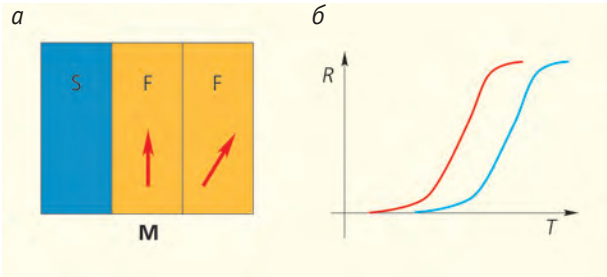



Рис.5. Спиновые вентили. Структура спинового вентиля (*а*) и сдвиг температурной зависимости его сопротивления при изменении взаимной ориентации магнитных моментов в соседних слоях (*б*).

В заключение хочется подчеркнуть, что исследования физики конкуренции сверхпроводимости и магнетизма отнюдь нельзя считать завершенными, работы эти продолжаются весьма интенсивно в целом ряде экспериментальных и теоретических групп, и мы надеемся, что в ближайшие годы общие усилия продемонстрируют нам дальнейшее успешное развитие идеи Виталия Лазаревича, высказанной им в его пионерной работе 50-х годов. ■

* Поверхность Ферми — изоэнергетическая поверхность в квази-импульсном пространстве, отделяющая заполненные электронные состояния от незаполненных при нулевой температуре.

## Литература / References

1. *Гинзбург В.Л.* Ферромагнитные сверхпроводники. ЖЭТФ. 1956; 31: 202–214. [*Ginzburg V.L.* Ferromagnetic superconductors. JETP. 1957; 4: 153–161].
2. *Буздин А.И., Булаевский Л.Н., Кулич М.Л., Панюков С.В.* Магнитные сверхпроводники. УФН. 1984; 144: 597–641. [*Buzdin A.I., Bulaevskii L.N., Kulich M.L., Panyukov S.V.* Magnetic superconductors. Sov. Phys. Usp. 1984; 27: 927–953.]

3. *Bulaevskii L.N., Buzdin A.I., Kulic M.L., Panjukov S.V.* Coexistence of superconductivity and magnetism. Theoretical predictions and experimental results. Advances in Physics. 1985; 34: 175–261.
4. *Maple M.B., Fisher Ø.* Magnetic superconductors. Superconductivity in Ternary Compounds II, Topics in Current Physics. Berlin, 1982.
5. *Anderson P.W., Suhl H.* Spin alignment in the superconducting state. Phys. Rev. 1959; 116: 898–900.
6. *Aoki D., Huxley A., Ressouche E. et al.* Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in URhGe. Nature. 2001; 413: 613–616.
7. *Buzdin A., Flouquet J.* Magnetism and Superconductivity, Chapter in Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials : Fundamentals and Theory. New York, 2007.
8. *Huy N.T., Gasparini A., D.E. de Nijs D.E. et al.* Superconductivity on the border of weak itinerant ferromagnetism in UCoGe. Phys. Rev. Lett. 2007; 99: 067006 1–4.
9. *Aoki D., Flouquet J.* Ferromagnetism and superconductivity in Uranium compounds. Phys. Soc. Jpn. 2012; 81: 011003 1–11.
10. *Вещунов И.С., Винников Л.Я., Столяров В.С.* Визуализация структуры магнитного потока в допированных фосфором монокристаллах $EuFe_2As_2$. Письма в ЖЭТФ. 2017; 105: 87–92. [*Veshchunov I.S., Vinnikov L.Ya., Stolyarov V.S. et al.* Visualization of magnetic flux structure in phosphorus-doped $EuFe_2As_2$ single crystals. JETP Letters. 2017; 105: 98–102.]
11. *Linder J., Robinson J.W.A.* Superconducting spintronics. Nature Physics. 2015; 11: 307–315.
12. *Buzdin A.I., Melnikov A.S.* Domain wall superconductivity in ferromagnetic superconductors. Phys. Rev. B. 2003; 67: 020503 1–4.
13. *Aladyshkin A.Yu., Buzdin A.I., Fraerman A.A. et al.* Domain-wall superconductivity in hybrid superconductor-ferromagnet structures. Phys. Rev. B. 2003; 68: 184508 1–7.
14. *Aladyshkin A.Yu., Silhanek A.V., Gillijns W., Moshchalkov V.V.* Nucleation of superconductivity and vortex matter in superconductor — ferromagnet hybrids. Supercond. Sci. Technol. 2009; 22: 053001 1–67.
15. *Буздин А.И., Булаевский Л.Н., Панюков С.В.* Осцилляции критического тока в зависимости от обменного поля и толщины ферромагнитного металла (F) в джозефсоновском контакте S-F-S. Письма в ЖЭТФ. 1982; 35: 147–148. [*Buzdin A.I. , Bulaevskii L.N., Panyukov S.V.* Critical-current oscillations as a function of the exchange field and thickness of the ferromagnetic metal (F) in an S-F-S Josephson junction. JETP Letters. 1982; 35: 177–180.]
16. *Буздин А.И., Куприянов М.Ю.* Джозефсоновский контакт с ферромагнитной прослойкой, Письма в ЖЭТФ. 1991; 53: 308–312. [*Buzdin A.I., Kupriyanov M.Yu.* Josephson junction with a ferromagnetic layer. JETP Letters. 1991; 53: 321–325.]
17. *Ryazanov V.V. Oboznov V. A., Rusanov A. Yu. et al.* Coupling of two superconductors through a ferromagnet: evidence for a p junction. Phys. Rev. Lett. 2001; 86: 2427 1–4.
18. *Buzdin A.I.* Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures. Rev. Mod. Phys. 2005; 77: 935–976.
19. *Bergeret F.S., Volkov A.F., and Efetov K.B.* Odd triplet superconductivity and related phenomena in superconductor-ferromagnet structures. Rev. Mod.Phys. 2005; 77: 1321–1373.

## Physics of interplay between superconductivity and magnetism

A.I.Buzdin[1], A.S.Mel'nikov[2]
[1]*University of Bordeaux (Bordeaux, France)*
[2]*Institute of Physics of Microstructures, RAS (Nizhny Novgorod, Russia)*

Experimental and theoretical works studying the interplay of superconducting and magnetic orderings in different systems are known to form a rapidly developing modern direction in the physics of superconductivity. Original ideas of V.L.Ginzburg on this problem were suggested in one of his seminal works more than half a century ago. Electrodynamic and exchange mechanisms of interaction between superconductivity and magnetism manifest themselves in many exciting phenomena in ferromagnetic superconductors and artificial hybrid structures. The presence of a domain structure in a ferromagnet results in additional interesting peculiarities of the superconducting state. The interest to such systems is motivated by the obvious importance of the fundamental problem of the interplay between different types of orderings in condensed matter physics and also by the perspectives to use the superconductor-ferromagnet structures for the design of devices of superconducting spintronics such as spin valves, superconducting channels with a controlled geometry and Josephson junctions with a spontaneous difference of superconducting phases. The idea to use these structures for the development of a modern cryoelectronics is based on the possibility to tune the superconducting critical temperature and the superconducting currents changing the magnetic state of the ferromagnetic subsystem.

**Keywords:** superconductivity, ferromagnetism, spintronics, Cooper pairs, exchange field.

# Новая жизнь теории среднего поля

В.М.Фридкин
*Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» (Москва, Россия)*

Феноменологическую теорию сегнетоэлектричества В.Л.Гинзбург развил на основе теории Ландау для фазовых переходов II рода еще в 1945 г. Новая теория, получившая название «теория среднего поля», хорошо объясняла все наблюдаемые свойства сегнетоэектриков, за исключением одного. А именно: предсказываемые ею значения коэрцитивного поля, при котором происходит переключение направления поляризации кристалла на противоположное, оказались на два-три порядка выше экспериментально наблюдаемых. Это противоречие удалось объяснить позднее, когда было открыто разбиение сегнетоэлектрика на домены, области с разными направлениями вектора поляризации, что было связано со стремлением кристалла минимизировать свободную энергию. Переключение в реальных, полидоменных, образцах было названо несобственным, в отличие от собственного, присущего монодоменному кристаллу. Долгое время последнее оставалось лишь теоретической абстракцией. Однако в конце прошлого века были развиты новые технологии, позволившие получать монокристаллические ультратонкие сегнетоэлектрические пленки толщиной на уровне единиц нанометров (в один-два монослоя), т.е. меньше, чем диаметр критического зародыша домена. В таких по сути двумерных сегнетоэлектриках удалось наблюдать настоящее собственное переключение, которое описывает теория Гинзбурга—Ландау.

**Ключевые слова:** фазовый переход, сегнетоэлектрики, домены, переключение.

Виталия Лазаревича Гинзбурга физики называют последним классиком. Диапазон его работ и интересов простирался от астрофизики и физики элементарных частиц до сверхпроводимости и кристаллооптики. Среди прочих достижений ученого не последнее место занимает создание термодинамической теории сегнетоэлектричества (теории среднего поля Гинзбурга—Ландау).

***Владимир Михайлович Фридкин**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института кристаллографии имени А.В.Шубникова РАН. Область научных интересов — теория конденсированных сред, фазовые переходы, сегнетоэлектрики.*

## Загадка переключения сегнетоэлектриков

Напомню суть феномена сегнетоэлектричества, известного уже около столетия: некоторые диэлектрические кристаллы при температурах ниже так называемой температуры Кюри самопроизвольно поляризуются — в них появляется постоянный дипольный момент в макроскопических масштабах. Поляризация возникает в отсутствие внешнего электрического поля (при его приложении направление момента может быть изменено) благодаря перестраивающему кристаллическую структуру фазовому переходу. Переходы бывают разного характера — могут слегка сдвинуться из своих положений ионы, могут упорядочиться уже имеющиеся в решетке диполи. Настоящий интерес к явлению возник после того, как в 1945 г. Б.М.Вул и И.М.Гольдман открыли этот эффект у титаната бария ($BaTiO_3$), выдающиеся нелинейные характеристики которого венчались поистине гигантскими значениями диэлектрической проницаемости, что обеспечило данному материалу долгую прикладную судьбу. Когда стало ясно, что сегнетоэлектрическими свойствами должно обладать огромное число кристаллов, принадлежащих к 10 точечным группам симметрии (так называемым пироэлектрическим группам), Гинзбург в том же году (а несколько позже А.Девоншир) развил феноменологическую теорию сегнетоэлектричества (теорию среднего поля) [1, 2], основанную на теории фазовых переходов второго рода Ландау [3]. Свое название она получила потому, что при анализе действия локального электри-

© Фридкин В.М., 2017

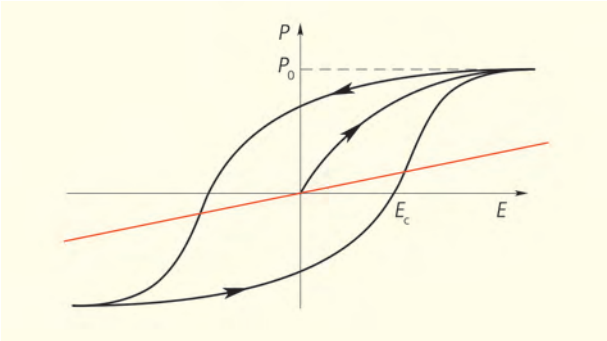



Рис.1. Схематическое представление зависимости поляризации сегнетоэлектрика от величины приложенного электрического поля. Собственный дипольный момент здесь может существовать и в отсутствие поля ($P_0$). Заставить вектор поляризации изменить свое направление на противоположное удается, лишь когда внешнее поле достигает пороговой величины ($E_c$). Красной линией показана зависимость от поля для наведенной им поляризации в обычном (линейном) диэлектрике.

ческого поля внутри диэлектрика истинное поле, которое меняется на атомных масштабах очень сильно, заменяется неким средним полем. Согласно подходу Ландау, предполагается, что в окрестности перехода свободная энергия может быть записана в виде ряда по степеням параметра, который характеризует переход (поляризации в данном случае), причем коэффициенты при некоторых степенях параметра зависят от температуры. Равновесная величина поляризации при любой температуре соответствует значению, которое минимизирует свободную энергию.

Теория Гинзбурга—Ландау объяснила все известные свойства сегнетоэлектрических кристаллов и пленок с фазовыми переходами второго и первого рода (в области критической точки), включая появление петли гистерезиса, которая наблюдается в процессе переключения — изменения направления вектора поляризации при достижении внешним электрическим полем порогового (так называемого коэрцитивного) значения (рис.1). С одним, но существенным исключением — данная теория предсказывала коэрцитивные поля на два-три порядка больше, чем измеренные как в сегнетовой соли, так и в титанате бария. Это противоречие оставалось невыясненным в течение нескольких лет; иначе говоря, механизм переключения был непонятен.

## Спасительные домены: почему они возникают?

В 1948 г. важное открытие на пути объяснения механизма переключения сегнетоэлектриков было сделано в работе М.В.Классен-Неклюдовой, М.А.Чернышевой и А.А.Штенберга [4]: были впервые обнаружены сегнетоэлектрические домены, т.е. отдельные области кристалла с определенным направлением вектора поляризации, отличным от такового по соседству. В последующие годы М.А.Чернышева и В.Л.Инденбом исследовали динамику доменов в сегнетовой соли во внешних механических и электрических полях [5, 6], а В.П.Константинова, В.А.Юрин и др. — в триглицинсульфате (ТГС) [7, 8]. То были первые шаги в понимании механизма переключения сегнетоэлектриков. В.Мерц обнаружил домены и их движение во внешнем поле в титанате бария [9], получив при этом следующую зависимость времени переключения $\tau$ от приложенного напряжения $V$:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{V_0}{V}\right), \qquad (1)$$

где $\tau_0$, $V_0$ — константы. Результаты Чернышевой и Инденбома для сегнетовой соли и Мерца для титаната бария позволили наконец объяснить расхождение между теоретическим, по Гинзбургу—Ландау (так называемым собственным), и экспериментальным (несобственным) значениями коэрцитивного поля. Теория Гинзбурга—Ландау рассматривала бесконечную однородную среду, в то время как реальные сегнетоэлектрические кристаллы неоднородны и разбиты на домены. В чем причина этого разбиения?

Для простоты представим себе сегнетоэлектрический одноосный кристалл — диэлектрик со спонтанной поляризацией $P$ (в нем вектор **P** может быть направлен либо в одну сторону, либо в противоположную). Во внешней бесконечной среде он создает поле $E = P/\varepsilon$, где $\varepsilon$ — диэлектрическая проницаемость. Чтобы свести к минимуму свободную энергию, кристалл разбивается на домены (в данном случае со 180-градусными стенками, которые обозначают «голова к хвосту»: имеется в виду, что на границах доменов векторы поляризации направлены в противоположные стороны), рис.2. Разумеется, в этом объяснении мы пренебрегаем возможным экранированием поляризации внешними (адсорбированными ионами воздуха) или внутренними зарядами. Чтобы создать монодоменный кристалл, его следует поляризовать во внешнем коэрцитивном поле $E_c^{int} = P/\varepsilon$, которое называется собственным. Домены облегчают монодоменизацию сегнетоэлектрика. В этом случае коэрцитивное поле $E_c^{ext} << E_c^{int}$. Коэрцитивное поле $E_c^{ext}$, связанное с доменами, стало называться несобственным.

Доменная структура сегнетоэлектрических кристаллов не является произвольной и подчиняется, согласно принципу Кюри, правилам симметрии [10]. Симметрия совокупности доменов в сегнетоэлектрической фазе — это подгруппа симметрии кристалла в параэлектрической фазе (выше температуры Кюри, где спонтанная поляризация отсутствует). Впервые анализ всех возможных переходов из 32 точечных групп симметрии в 10 пи-

роэлектрических групп, а также вариантов направлений спонтанной поляризации и доменной структуры был сделан И.С.Желудевым и Л.А.Шуваловым [11].

А.А.Колмогоров, М.Аврами и И.Ишибаши (KAI) предложили теорию доменного переключения [12–14], которая показала, что зависимость $\tau = \tau(V)$ определяется размерностью и формой доменов, их распределением по размеру и вероятностью зародышеобразования. Так или иначе, эта зависимость в теории KAI оказывается, подобно (1), экспоненциальной. Надо заметить, что экспоненциальная функция, отражая активационный характер процесса, не предполагает наличия истинного порога — величины поля, ниже которого переключение энергетически недопустимо, как это имеет место в теории среднего поля. Но петли гистерезиса по-прежнему наблюдаются, хоть и не такой правильной формы, как на рис.1, и именно по их полуширине определяется коэрцитивное поле.

В 2009 г. А.К.Таганцев, Л.Кросс и Дж.Фоусек опубликовали монографию, посвященную доменам и их роли в процессе переключения сегнетоэлектрических кристаллов и пленок [15]. Нельзя сказать, что концепция доменного переключения не встречала при своем развитии препятствий. Но в результате их преодоления удавалось понимать протекающие процессы все лучше, как это произошло с так называемым парадоксом Ландауэра [15]. Р.Ландауэр считал, что в экспериментальных условиях энергия возникновения критического зародыша домена слишком велика и потому вероятность возникновения доменов обратного знака слишком мала. Этот парадокс был устранен Таганцевым с помощью учета взаимодействия кристалла и электрода [15]. Было показано, что реальная энергия образования критического зародыша домена значительно меньше и зависит от поверхностной энергии взаимодействия.

Что касается геометрических соображений, то размер критического зародыша домена оценивается в пределах 1–5 нм: в сравнении с размером объемных кристаллов или сегнетоэлектрических пленок, полученных разными методами к началу 90-х годов, он ничтожно мал. Поэтому никаких проблем с пространственной организацией доменов не возникало и собственное переключение оставалось лишь теоретической абстракцией. Но затем ситуация изменилась.

## Возможно ли переключение без доменов? Двумерные сегнетоэлектрики

Новым этапом исследований стало изучение переключения сверхтонких монокристаллических пленок. Эту работу автор данной статьи с сотрудниками выполнял совместно с лабораторией жидких кристаллов Института кристаллографии имени А.В.Шубникова РАН и Лабораторией С.Дюшарма в Университете Небраски—Линкольна (США) в 1993–2003 гг. [16, 17].

Начало было положено открытием нового метода выращивания сверхтонких монокристаллических сегнетоэлектрических пленок сополимера винилиденфторида-трифторэтилена [18]. В сегнетоэлектрической фазе пленки орторомбические (точечная группа $2m$), что было подтверждено рентгено- и электронографически, а также сканирующей туннельной микроскопией. Пленки толщиной в один-два монослоя 0.5–1 нм показывали переключение и фазовый переход в параэлектрическую фазу. Столь тонкие сегнетоэлектрические пленки («двумерные сегнетоэлектрики») были описаны впервые. Поскольку их толщина меньше размера критического зародыша домена, встал вопрос о механизме переключения. Так как доменная теория KAI в этом случае неприменима, пришлось думать о бездоменном (однородном) переключении этих пленок. Исследование кинетики их переключения подтвердило данное предположение и показало, что она хорошо описывается в рамках теории Гинзбурга—Ландау с помощью уравнения Ландау—Халатникова, т.е. механизм оказывается однородным [19]. Зависимость времени переключения $\tau$ от напряжения $V$ для сегнетоэлектрика с фазовым переходом первого ряда дается соотношением

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1}\left(\frac{V}{V_c} - 1\right)^{1/2}, \qquad (2)$$

где $V_c$ — коэрцитивное напряжение Гинзбурга—Ландау, $\tau_0^{-1}$ — константа. Доменное переключение, как уже упоминалось в связи

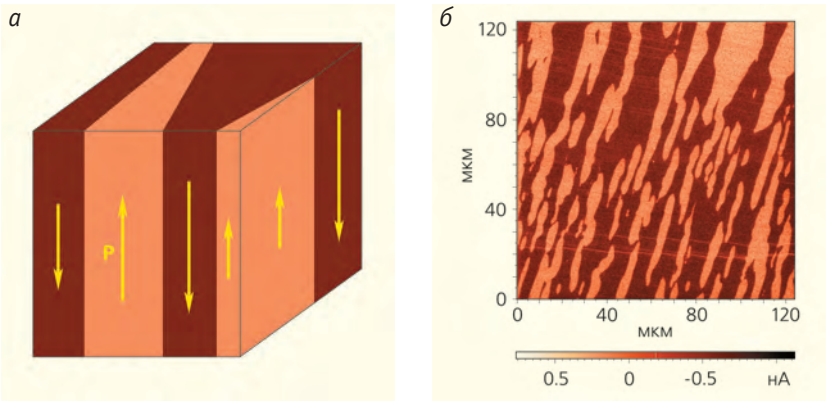



Рис.2. Модельное разбиение объема сегнетоэлектрика ниже температуры Кюри на домены (*а*) и реальные домены, наблюдаемые на поверхности (010) кристалла триглицинсульфата с помощью специального режима атомно-силовой микроскопии — режима пьезоотклика (*б*). Изображение предоставлено Р.В.Гайнутдиновым.

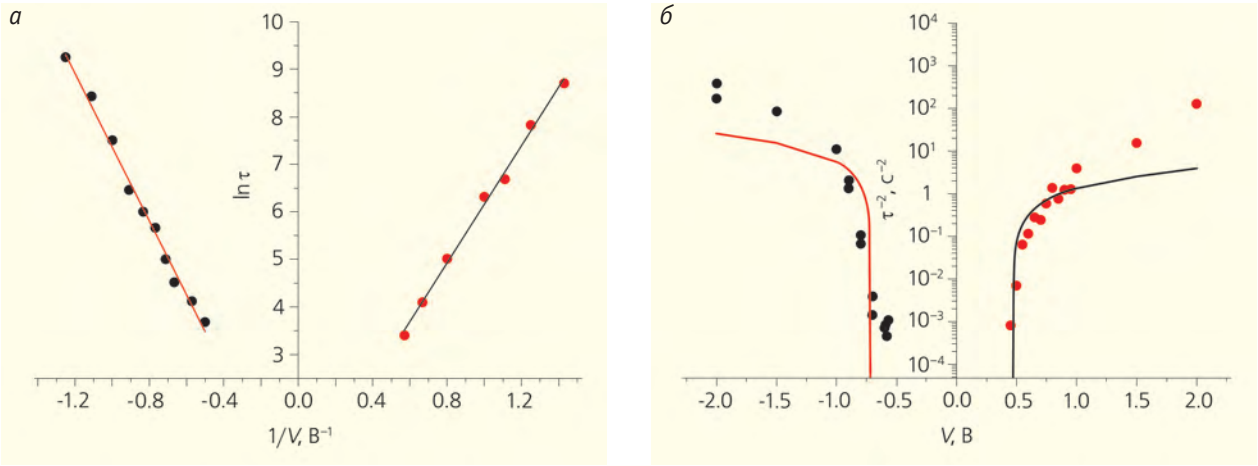



Рис.3. Зависимость времени переключения от приложенного напряжения для объемного кристалла (*а*) и монокристаллической пленки (*б*) титаната бария. Разный характер зависимости (отсутствие порога в первом случае, когда переключение доменное, и его наличие во втором для однородного переключения) отражает разницу в механизме переключения [21].

с формулой (1), не имеет критического поля (напряжения), т.е. по существу не имеет коэрцитивного поля $E_c$, так как последнее (несобственное коэрцитивное поле) зависит от времени переключения (частоты). Напротив, однородное переключение имеет не зависящее от частоты собственное коэрцитивное поле, совпадающее с теоретическим по Гинзбургу—Ландау. Для напряжений $V < V_c$ однородного переключения сегнетоэлектрика не происходит. Как это ни парадоксально, теория Гинзбурга—Ландау описывает сегнетоэлектрическое переключение лишь для сверхтонких кристаллов, толщина которых меньше (или сравнима) с размером критического зародыша домена.

## Предсказание Гинзбурга

Вскоре после того как в «Nature» вышла статья [16], она обсуждалась в очередную среду на традиционном семинаре Виталия Лазаревича. Год спустя Гинзбург в своей новой статье в «УФН», посвященной наиболее перспективным направлениям исследований в физике, отметил важность изучения сверхтонких (двумерных) сегнетоэлектрических пленок [20], выделив их в своем Списке из общей проблемы фазовых переходов (фигурирующей в нем) в отдельный пункт.

С самого начала было ясно, что кинетика однородного (бездоменного) переключения (2) неспецифична для сегнетоэлектрических полимеров и должна наблюдаться во всех без исключения сверхтонких сегнетоэлектрических кристаллах. Это хорошо понимал Гинзбург. Экспериментально данный факт впервые удалось доказать в 2013 г. для сверхтонких лазерно-эпитаксиальных пленок титаната бария автору настоящей статьи с сотрудниками [21]. Пленки $BaTiO_3$ толщиной 3–10 нм обнаруживали однородное переключение (2), рис.3. Более того, как видно из этого рисунка, удалось наглядно продемонстрировать разницу в механизмах переключения в зависимости от толщины: более толстые пленки $BaTiO_3$ показывали доменное переключение (1), а собственное коэрцитивное поле по Гинзбургу—Ландау, наблюдавшееся в диапазоне 3–10 нм (~$10^8$ В·см$^{-1}$), сменялось меньшим по величине несобственным. В настоящее время переход доменного переключения в бездоменное (однородное) в области толщин пленок, сравнимых с размером критического зародыша, широко исследуется в сегнетоэлектриках [22].

Важность изучения наноразмерных сегнетоэлектриков, предсказанная Гинзбургом, сегодня подтверждается их многочисленными применениями в элементах памяти, фотовольтаике и пироэлектрических приемниках.■

## Литература / References

1. *Гинзбург В.Л.* О диэлектрических свойствах сегнетоэлектриков и титаната бария. ЖЭТФ. 1945; 15: 739–750. [*Ginzburg V.L.* On the dielectric properties of ferroelectric (seignetteelectric) crystals and barium titanate. J. Phys. 1946; 10: 107–115.]
2. *Гинзбург В.Л.* О поляризации и пьезоэффекте титаната бария вблизи точки сегнетоэлектрического перехода. ЖЭТФ. 1949; 19: 36–41. [*Ginzburg V.L.* About polarization of barium titanate near ferroelectric transition point. JETF. 1949; 19: 36–41. (In Russ.).]
3. *Ландау Л.Д.* Теория фазовых переходов. II. ЖЭТФ 1937; 7: 627. [*Landau L.D.* Theory of phase transformations. Phys. Z. Sowjetunion. 1937; 11: 545.]

4. *Классен-Неклюдова М.В., Чернышева М.А., Штейнберг А.А.* О реальном строении кристаллов сегнетовой соли. Докл. АН СССР. 1948; 63: 527–530. [*Klassen-Neklyudova M.V., Chernysheva M.A., Shtenberg A.A.* About real structure of Rochelle salt crystals. Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1948; 63: 527–530. (In Russ.).]
5. *Чернышева М.А.* Некоторые детали доменного строения кристаллов сегнетовой слои (по оптическим наблюдениям). Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1957; 21: 289–292. [*Chernysheva M. A.* Some details of the domain structure of crystals of Rochelle salt. Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Fiz. 1957; 21: 289–292. (In Russ.).]
6. *Инденбом В.Л., Чернышева М.А.* Кольцо краевой дислокации в кристалле сегнетовой соли. Докл. АН СССР. 1956; 111: 596–598. [*Indenbom V.L., Chernysheva M.A.* Edge dislocation loop in a Rochelle salt crystal. Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1956; 111: 596–598. (In Russ.).]
7. *Константинова В.П.* Границы доменов и сетки ямок травления в кристаллах дейтерированного триглицинсульфата. Изв. АН СССР. Сер. физ. 1960; 24: 1324–1328. [*Konstantinova V.P.* Domain walls and etch pits in deuterated triglycine sulfate crystals. Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Fiz.1960; 24: 1324–1328. (In Russ.).]
8. *Юрин В.А., Белугина Н.В., Мелешина В.А. и др.* Доменная структура γ-облученных кристаллов триглицинсульфата. Изв. АН СССР. Сер.физ. 1971; 35: 1927–1930. [*Yurin V.A., Belugina N.V., Meleshina V.A., et al.* Domain structure of γ-irradiated crystals of triglysine sulfate. Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Fiz. 1971; 35: 1927–1930. (In Russ.).]
9. *Merz W.* Double hysteresis loop of $BaTiO_3$ at the Curie point. Phys. Rev. 1953; 91: 513–517.
10. *Шубников А.В.* О работах Пьера Кюри в области симметрии. УФН. 1956; 59: 591–602. [*Shubnikov A.V.* About P. Curie's works in symmetry field. Usp. Fiz. Nauk. 1956; 59: 591–602. (In Russ.).]
11. *Желудев И.С., Шувалов Л.А.* Сегнетоэлектрические фазовые переходы и симметрия кристаллов. Кристаллография. 1956; 1: 681–688. [*Zheludev I.S., Shuvalov L.A.* Ferroelectric phase transitions and symmetry of crystals. Kristallografiya. 1956; 1: 681–688. (In Russ.).]
12. *Ishibadhi I.* Theory of polarization reversals in ferroelectrics based on Landau-type free energy. Jpn. J. Appl. Phys. 1992; 31: 2822–2824.
13 *Колмогоров А.Н.* К статистической теории кристаллизации металлов. Изв. АН СССР. Сер. мат. 1937; 1: 355–359. [*Kolmogorov A.N.* To statistical theory of metal crystallization. Izv. AN SSSR. 1937; 1: 355–359. (In Russ.).]
14. *Avrami M.J.* Kinetics of phase change. II Transformation-time relations for random distribution of nuclei. Chem. Phys. 1940; 8: 212–224.
15. *Tagantsev A.K., Cross L.E., Fousek J.* Domains in Ferroelectric Crystals and Thin Films. New York, 2010.
16. *Bune A.V., Fridkin V.M., Ducharme S. et al.* Two-dimensional ferroelectric films. Nature. 1998; 391: 874–877.
17. *Fridkin V., Ducharme S.* Ferroelectricity at the nanoscale. Phys. Usp. 2014; 57: 597-603.
18. *Palto S., Blinov L., Bune A. et al.* Ferroelectric Langmuir-Blodgett films. Ferroelectrics. 1996; 184: 127–129.
19. *Ducharme S., Fridkin V.M., Bune A.V. et al.* Intrinsic Ferroelectric Coercive Field. Phys. Rev.Let. 2000; 84: 175.
20. *Гинзбург В.Л.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? УФН. 1999; 169: 419–441. [*Ginzburg V.L.* What problems of physics and astrophysics seem now to be especially important and interesting (thirty years later, already on the verge of XXI century?). Phys. Usp. 1999; 42: 353–373.]
21. *Gaynutdinov R., Minnekaev M., Mitko S. et al.* Polarization switching kinetics in ultrathin ferroelectric barium titanate film. Phys. B. 2013; 424: 8–12.
22. *Tian B.B., Chen L.F., Liu Y. et al.* Homogeneous switching mechanism in pure polyvinylidene fluoride ultrathin films. Phys. Rev. B. 2015; 92: P.060102.

## New life of the Mean Field Theory

V.M.Fridkin
*Federal Science Research Center "Crystallography and photonics" (Moscow, Russia)*

A phenomenological theory of ferroelectricity was developed by V.L.Ginzburg on the basis of Landau theory of II kind phase transitions as recently as in 1945. The new theory called Mean Field Theory let to explain all the properties of ferroelectrics with only one exception. Namelly, predicted values of coercive electric field at which switching of polarization direction occurs, appeared to be two-three order larger than experimentally observed ones. This contradiction was eliminated later when ferroelectric dividing to domains (regions with different directions of polarization) related to crystal seeking for free energy minimum was discovered. Switching in real polydomain samples is called extrinsic in contrast to intrinsic in monodomain crystal. The later remained a theoretical abstraction for a long time. But a new technology was developed in the end of the previous century which allowed to obtain ultrathin ferroelectric films of thickness at nanometer level (one-two monolayers), i.e. less than critical domain nucleation size. In those practically two-dimensional ferroelectrics the true intrinsic switching described by Ginzburg—Landau theory was observed.

**Keywords:** phase transition, ferroelectrics, domains, switching.

# Годичные кольца китайского можжевельника: уникальная летопись климата

**Н.М.Даценко[1], Д.М.Сонечкин[2], Ч.Кин[3], Дж.-Дж.Лиу[3], Б.Янг[3]**
*[1]Гидрометцентр России (Москва, Россия)*
*[2]Институт океанологии имени П.П.Ширшова РАН (Москва, Россия)*
*[3]Институт исследований окружающей среды холодных и засушливых регионов Китайской академии наук (Ланчжоу, КНР)*

Дендрохронология — это наука, которая изучает особенности годичных приростов деревьев. Она зародилась в начале XX в., когда американские ученые, исследуя спилы тысячелетних секвой, нашли, что толщина их годичных колец меняется с периодом, похожим на одиннадцатилетний период изменения числа пятен на Солнце. Вскоре ряды толщин годичных колец стали использовать как индикаторы изменений климата в прошлом. Особенно показательными в этом отношении оказались ряды деревьев, произрастающих вблизи верхней (либо северной) границы леса. Среди них выделяются ряды можжевельника Пржевальского, распространенного в высокогорьях на северо-восточном краю Тибетского плато. Возраст таких деревьев может превышать тысячу лет. По ряду толщин годичных колец тысячелетних можжевельников Пржевальского удалось установить, что примерно за 4200 лет до н.э. рост деревьев резко замедлился. Это произошло в то время, когда, согласно археологическим данным, распалось самое древнее Египетское царство и несколько других человеческих цивилизаций (в Китае, Индии, Месопотамии). Имеющиеся геологические данные позволяют связать эти цивилизационные катастрофы с мощнейшим извержением вулкана Гекла в Исландии. Еще один период резкого ухудшения роста деревьев отмечается примерно за 3000 лет до настоящего времени и совпадает по времени с извержением вулкана Тера в восточном Средиземноморье, повлекшим гибель самой древней цивилизации на острове Крит. Связь обоих вулканических извержений с гибелью древнейших человеческих цивилизаций уже была установлена ранее. Однако годичные приросты китайских можжевельников-долгожителей впервые показали, что спустя немногие сотни лет после этих извержений условия для роста деревьев стали особенно благоприятными. Вероятно, это произошло из-за того, что продукты вулканических извержений, следы которых найдены практически по всему Северному полушарию, обогатили почвы. Неудивительно, что в эти периоды возникли многие новые человеческие цивилизации.

**Ключевые слова:** дендрохронология, можжевельник Пржевальского, годичные кольца деревьев, вулканы, древние цивилизации.

Современное изменение климата многими рассматривается как беспрецедентно быстрое из-за вызванного человеком увеличения концентрации в атмосфере так называемых парниковых газов, прежде всего углекислого. Те, кто в этом сомневается, говорят, что такое бывало и в прошлом. Для разрешения этой дилеммы в течение последних нескольких десятилетий были существенно активизированы исследования климатов прошлых тысячелетий.

Поскольку прямые измерения климатических характеристик (температуры воздуха, количества осадков и др.) в те далекие времена не велись, эти данные получают на основе косвенных откликов на изменяющийся климат различных индикаторов — изотопного состава донных отложений в океанах и озерах, ледниковых кернов Антарктиды и Гренландии, сталактитов и сталагмитов и т.д.

К одним из наиболее часто используемых палеоклиматических индикаторов относятся кольца годичных приростов деревьев. Однако далеко не все деревья могут хранить в своих стволах палеоклиматическую летопись. Первыми объектами исследований были знаменитые североамериканские секвойи, способные жить до 3 тыс. лет и даже более. Пионеры науки дендрохронологии, американцы Э.Дуглас, В.Ла-Марше, Е.Шульман и др., определили, что приросты секвой меняются циклически с периодом, близким одиннадцатилетнему циклу изменений числа пятен на Солнце. Но, несмотря на свою долговечность, секвойи оказались не очень полезны для выявления вековых и многовековых климатических колебаний. Дело в том, что

© Даценко Н.М., Сонечкин Д.М., Кин Ч., Лиу Дж.-Дж., Янг Б., 2017

***Нина Михайловна Даценко,*** *кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Гидрометцентра России. Область научных интересов — динамика климата в прошлом и настоящем, численный долгосрочный прогноз погоды.*

***Дмитрий Михайлович Сонечкин,*** *доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института океанологии имени П.П.Ширшова РАН. Научные интересы связаны с применением методов современной математической теории динамических систем к задачам динамики климата и численного долгосрочного прогноза погоды.*

***Чун Кин (Chun Qin),*** *научный сотрудник Института исследований окружающей среды холодных и засушливых регионов Китайской академии наук. Занимается реконструкциями и исследованием климатов прошлого.*

***Джин-Джин Лиу (Jing-Jing Liu),*** *научный сотрудник того же института. Область научных интересов — палеоклиматы и их реконструкция.*

***Бао Янг (Bao Yang),*** *заведующий лабораторией того же института. Специалист в области палеогеографии и палеоклиматологии.*


секвойи способны хорошо адаптироваться к происходящим постепенно долгопериодным изменениям климата.

Некоторые другие североамериканские хвойные живут не менее долго, чем секвойи. Это, например, остистые сосны (*Pinus longaeva*). Так, возраст остистой сосны Прометей, срубленной в 1964 г., составил 4862 года, а возраст старейшей из ныне живущих сосен — Мафусаила — достигает 4847 лет. Такие деревья растут на высоте нескольких тысяч метров над уровнем моря, на верхней границе ареала своего распространения, где их жизнь держится на волоске. Поэтому они реагируют на долгопериодные изменения климата весьма существенно.

Используя данные, полученные при исследовании Мафусаила и других остистых сосен, произрастающих в той же самой горной долине в Калифорнии (США), американские ученые составили летопись толщин их годичных приростов (дендрохронологию) — «Тропу Мафусаила». Она покрывает период более 7 тыс. календарных лет. В этой и других подобных дендрохронологиях, составленных для разных районов североамериканских Кордильер, например в дендрохронологии «Хозяин Белых гор», видны циклические изменения годичных приростов с самыми разными периодами.

Наиболее выраженным в американских дендрохронологиях оказался период приблизительно 1600 лет. Самое крупное похолодание фиксируется около 5 тыс. лет назад, а самый недавний термический максимум — за тысячу лет до настоящего времени. Он совпадает по времени с так называемой Средневековой теплой эпохой, иначе называемой Эпохой викингов, ибо именно тогда викинги открыли и колонизовали Гренландию. Этот период детально изучен палеоклиматологами по многим другим индикаторам, включая европейские исторические хроники.

Тысячелетние можжевельники Китая.

Здесь и далее фото Ч.Кина

Однако стоит заметить, что другая хорошо изученная палеоклиматологами теплая эпоха, приходившаяся на время расцвета Римской империи (самое начало нашей эры), в дендрохронологиях остистых сосен представлена не улучшением, а существенным ухудшением климатических условий. Такое впечатление, что на начало нашей эры сдвинуто похолодание, которое было свойственно так называемому Темному средневековью (400–800-е годы), а длина вышеупомянутого 1600-летнего цикла в пионерных дендрохронологиях американских исследователей кажется завышенной (тем более что этот цикл не был найден ни в одной из дендрохронологий, опубликованных позже).

Этой ситуации есть объяснение. Так, некоторые американские ученые, работавшие уже во второй половине XX в., обратили внимание на то, что остистые сосны способны образовывать несколько колец приростов в течение одного вегетационного периода. Это бывает, например, в случае, когда из-за долгого отсутствия дождей запасы влаги в почве исчерпываются и дерево прекращает рост, а затем возобновляет его после выпадения достаточного количества осадков. Если не принимать это во внимание (что и случилось в исследованиях американских ученых), общая длина получаемых дендрохронологий остистых сосен преувеличивается и, значит, периоды видимых в них циклов завышаются.

Здесь следует упомянуть, что вопрос о датировке колец годичных приростов деревьев, т.е. об установлении календарного года, когда образовалось то или иное кольцо, достаточно сложен. Радиоуглеродный метод, который часто используется для установления возраста исторических артефактов, не позволяет установить дату с точностью до года, как это требуется в дендрохронологии. Поэтому специалисты обычно не пользуются этим методом, а начинают датировку с живых деревьев, чьи керны взяты в известном календарном году. Вариации приростов этих деревьев и тех, что жили несколько ранее, сравнивают и находят совпадающие участки. По ним датируются ранее жившие деревья. Затем аналогичные сравнения делаются с еще более старыми деревьями, те также датируются и т.д. Конечно, при этом возможны ошибки. Но они минимизируются при анализе большого количества экземпляров деревьев.

С середины XX в. дендрохронологические исследования начались в Западной Европе, Азии, Австралии, Южной Америке. В нашей стране возникли две школы дендрохронологов: одна — на Урале (в Свердловске, ныне Екатеринбурге) под руководством С.Г.Шиятова, другая — в Красноярске под руководством Е.А.Ваганова, ныне академика РАН. Советские дендрохронологи использовали в своих исследованиях гораздо более короткие ряды годичных приростов (обычно менее 400 лет) сосен,

Можжевельник Пржевальского, растущий на современной верхней границе леса (примерно 3500 м над ур.м.) на северо-восточном краю Тибетского плато.

Останки можжевельника Пржевальского, обнаруженные выше современной верхней границы леса на северо-восточном краю Тибетского плато.

лиственниц и елей. Техника обработки рядов в их исследованиях была усовершенствована с целью исключения влияния неклиматических факторов (возраста дерева, микроэкологических условий его произрастания). При этом, кстати, выяснилось, что 11-летний цикл солнечной активности, которому придавали большое значение пионеры американской дендрохронологии, не влияет на рост деревьев существенно. Главной стала задача выявления вековых и многовековых вариаций приростов, обусловленных изменениями климата. Ясно, что решение этой задачи было ограничено сравнительно небольшой длиной рассматривавшихся рядов годичных приростов деревьев. Образно говоря, эти ряды можно было сравнить с измерениями, например, температуры, сделанными в градусах Цельсия, Фаренгейта, Реомюра и т.д. без какой-либо взаимной калибровки.

Задача выявления долгопериодных колебаний климата по дендрохронологиям существенно упростилась после того, как исследования годичных приростов деревьев начались в КНР. Китайские ученые обнаружили, что в горах (на высотах 3000–3500 м над ур.м.) на северо-восточном краю Тибетского плато произрастают можжевельники, возраст которых достигает тысячи лет и более. Наибольшее внимание привлек можжевельник *Sabina przewalskii*, впервые описанный еще в XIX в. выдающимся российским исследователем Центральной Азии Н.М.Пржевальским. Живые деревья *S.przewalskii* составляют современную верхнюю границу леса в этом регионе Центрального Китая. Выше этой границы в условиях сухого климата и при отсутствии существенных экологических загрязнений сохранились остатки деревьев, живших за много веков до нашего времени.

Собранная к настоящему времени коллекция толщин годичных колец можжевельников Пржевальского состоит из тыся-

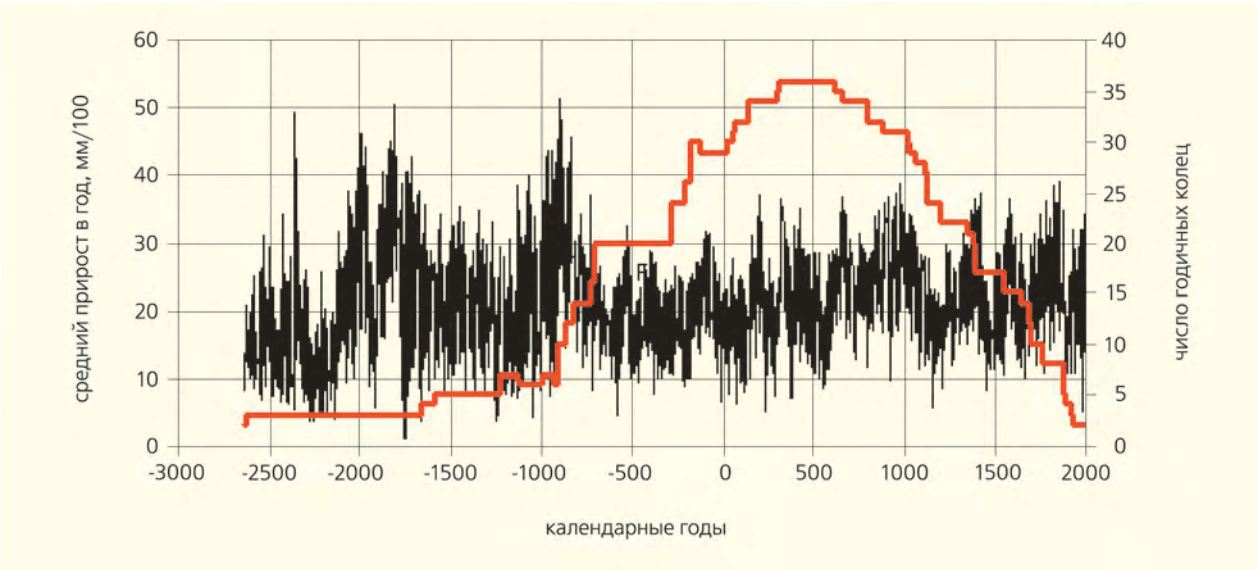
чи с лишним рядов. Среди них есть около сотни рядов продолжительностью более 1000 лет, в том числе 43 ряда длиной более 1500 лет. Один уникальный ряд имеет длину в 2504 года. Этот можжевельник рос с 2534 по 130 г. до н.э.

Полученные дендрохронологические данные показывают, что на период около 2250 г. до н.э. приходится группа самых малых годичных приростов. Самые же большие приросты наблюдались внутри двух временных интервалов: ~2000–1800 и 1000–800 лет до н.э. Между ними (примерно за 1600–1200 лет до н.э.) приросты опять были небольшими.

Ряд толщин годичных приростов можжевельника Пржевальского, остатки которого были найдены выше границы леса на северо-восточном краю Тибетского плато. Дерево прожило 2504 года.

Здесь уместно указать, что критическим фактором для роста можжевельника Пржевальского считается количество осадков. Если их выпадает много, это благоприятствует росту, если мало — рост замедляется. В рассматриваемый регион Центрального Китая осадки приносятся вместе с летними муссонами, переваливающими Гималайские горы. Муссоны несут не только влагу, но и более теплый воздух из Индии. Поэтому, если ширина каких-то годичных колец можжевельников Пржевальского больше средней, это означает, что муссон был сильнее обычного и, следовательно, для роста деревьев складывались благоприятные условия. Наоборот, узкие кольца формировались в неблагоприятных сухих и холодных условиях слабого муссона.

Индийский муссон — не обособленное явление в динамике климата. Степень его развития связана со многими другими одновременными изменениями в системе общей циркуляции атмосферы. Поэтому неудивительно, что отмеченные пиковые особенности дендрохронологии можжевельника Пржевальского взаимосвязаны с климатическими аномалиями в других регионах Земли. Так, к настоящему времени накоплено очень много палеоклиматических свидетельств того, что




Дендрохронология, построенная по данным 43 рядов годичных приростов можжевельника Пржевальского, каждый из которых прожил не менее 1500 лет. Красная ступенчатая линия указывает, сколько годичных колец приходится на каждый календарный год.

климатические условия в масштабах всего Северного полушария примерно за 4250 лет до настоящего времени были крайне неблагоприятными. Например, имеются археологические свидетельства и исторические хроники, которые сообщают, что это время совпадает с крушением самого древнего Египетского царства. Тогда же произошла деградация древней цивилизации в междуречье рек Тигра и Евфрата. Сходное катастрофическое развитие событий задокументировано для древней цивилизации на территории Индостана.

В попытках выяснить, чем вызваны все эти катастрофы, ученые обратили внимание на то, что примерно в 2310 г. до н.э. произошло чрезвычайно мощное извержение вулкана Гекла в Исландии. В атмосферу было выброшено несколько десятков кубических километров продуктов этого извержения. Слои вулканического пепла Геклы найдены во многих точках планеты. Запыление атмосферы привело к резкому похолоданию, которое, по-видимому, имело место во всем Северном полушарии. Североамериканские остистые сосны также зафиксировали это событие, замедлив свой рост.

Что касается сокращения годичных приростов можжевельников Пржевальского в середине 2-го тысячелетия до н.э., то его можно связать с другой известной катастрофой — извержением вулкана Тера на греческом острове Санторин. Оно произошло около 1610 г. до н.э., и с ним принято связывать исчезновение самой древней греческой цивилизации, называемой минойской.

Таким образом, китайские можжевельники-долгожители еще раз подтвердили, что многие древние цивилизации, существовавшие в 3-м и 2-м тысячелетиях до н.э., стали жертвами катастрофических вулканических извержений.

Интересно, что несколько сотен лет спустя после этих извержений толщина годичных колец можжевельников Пржевальского резко возросла. Представляется вероятным, что огромное количество выпавшего вулканического пепла сначала подавило жизнедеятельность растений, а по прошествии некоторого времени, наоборот, обогатило почвы минералами и тем самым ускорило рост деревьев. Так в долгосрочной перспективе сверхмощные вулканические извержения способствовали развитию новых человеческих цивилизаций. ■

**При выполнении данной работы Н.М.Даценко и Д.М.Сонечкин пользовались финансовой поддержкой РФФИ (проекты 16-05-00140 и 16-05-00092).**

## Annual tree-rings of Chinese junipers — a unique chronicle of the climate

N.M.Datsenko[1], D.M.Sonechkin, C.Qin[3], J.-J.Liu[3], B.Yang[3]
[1]*Hydrometeocentre of Russia (Moscow, Russia)*
[2]*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)*
[3]*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences (Lanzhou, China)*

Dendrochronology is a science which studies features of the annual tree growth. This science arose at the beginning of the 20th century when some American researchers, studying time series of the annual tree-rings of the sequoia species, found that widths of the tree-rings changed with a period similar to the 11-year period of the Sun spot variations. Interest in the dendrochronological studies increased during the second half of the 20th century when scientists began to use records of the tree-ring width as indicators of the past climate changes. In this regard, tree-ring records of the trees which grew near the upper and northern timberlines of the corresponding tree species were considered carefully. Among them especially interesting are records of the junipers growing on highlands on the northeast margin of the Tibetan Plateau such as *Juniperus przewalskii* which age can exceed one thousand years. Based on a number of the records of thousand-year-old *Juniperus przewalskii* it was succeeded to establish that approximately in 4200 years before present the tree growth was sharply slowed down. It occurred just at that time when, according to archaeological data, the most ancient Egyptian Kingdom and several other ancient human civilizations broke up (in China, India, and Mesopotamia). The available geological data allow to attribute these civilization catastrophes to the very power explosive eruption of the Hekla volcano in Iceland. One more period of a sharp deterioration of the tree growth was found near 3000 years before present. It coincided with the very powerful eruption the Santorino volcano in the eastern Mediterranean which entailed the death of the ancient civilization on the Crete Island. Connection of both explosive volcanic eruptions with the deaths of the most ancient human civilizations was established earlier. However, tree-ring records of the Chinese junipers long-livers, specified for the first time that after the few hundred years after these eruptions conditions for the tree growth became very favorable. Perhaps, it occurred because products of the volcanic eruptions, which traces were found practically everywhere in the Northern hemisphere, enriched soils. It is not surprising that during these periods many new human civilizations arise.

**Keywords:** dendrochronology, juniper, tree-rings, volcanoes, ancient human civilizations.

# Следы землетрясения в пещерном городе Вардзиа

А.М.Корженков, А.А.Варданян, Р.Ю.Стаховская
*Институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН (Москва, Россия)*

В статье приводится описание деформаций в пещерном городе Вардзиа — историческом памятнике XII–XIII вв. в Южной Грузии. Строительство пещерного города с многочисленными постройками, царскими палатами, церквями и монастырем проводилось специально, чтобы скрыть его от злейших врагов — персов и турок. Однако в результате сильного землетрясения в конце XIII в. приповерхностный слой на склоне горы, скрывавший город, обрушился и все внутренние строения обнажились. До сих пор неизвестен точный год произошедшей сейсмической катастрофы, а также положение ее эпицентральной области. В ходе наших исследований в Вардзии обнаружились сейсмогенные трещины в стенах пещерных построек, а также проявление так называемой цветковой структуры, которая однозначно свидетельствует о выходе сейсмического очага древнего землетрясения именно в пещерном городе, близ плоскости огромного древнего оползня. Здесь же проходят активные разломы северо-западного простирания, которые смещают четвертичные отложения р.Куры, протекающей у подножия скального комплекса. Мы предполагаем и по самой долине реки наличие активной разломной структуры, скрытой за семь столетий после землетрясения речными наносами. Грузинские сейсмологи, однако, обозначают эпицентр обсуждаемого землетрясения в 100 км северо-восточнее Вардзии, недалеко от г.Гори. Возможно, во время древнего сейсмического события (продолжавшегося, кстати, три месяца) произошло вспарывание нескольких сейсмогенных разрывов на большой площади южной и центральной частей Грузии. Таким образом, исследование параметров сильного землетрясения XIII в. находится еще только в самом начале. Археo-, палео- и историко-сейсмологические исследования в регионе должны быть продолжены для более правильной оценки сейсмической опасности Республики Грузия.

**Ключевые слова**: Грузия, Вардзия, пещерные города, древние землетрясения, активные разломы, цветковая структура, сейсмические деформации.

Вардзиа — пещерный монастырский комплекс XII–XIII вв., выдающийся памятник средневекового грузинского зодчества. Он расположен вблизи одноименного села в Аспиндзском р-не провинции Самцхе-Джавахети, в долине р.Куры, примерно в 70 км к югу от г.Боржоми. На протяжении почти километра вдоль левого берега Куры, в отвесной туфовой стене горы Эрушети (Медвежьей) высечено более 500 помещений: церквей, часовен, жилых келий, кладовых, бань, трапезных, казнохранилищ, библиотек. Этот комплекс уходит на 50 м вглубь скалы и поднимается на высоту в 13 этажей. Сохранились потайные ходы, связывавшие помещения и остатки водопровода и оросительной системы.

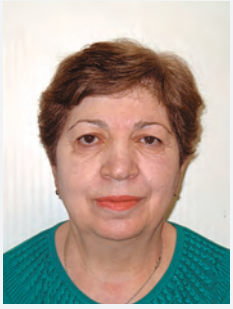
Расположение исторического памятника Вардзиа (показано красным прямоугольником) близ границы с Турцией. Звездочкой обозначен предполагаемый эпицентр землетрясения 1283 г. (1275?).

## Исторический экскурс

Строительство Вардзии началось в 50-е годы XII в. по приказу царя Георгия III. Однако ему не хватило времени, чтобы закончить дело. В 1184 г. он скончался, оставив сооружение пещерного комплекса в самом разгаре. Трон перешел дочери Георгия III — Тамаре. Именно при ней был задуман

© Корженков А.М., Варданян А.А., Стаховская Р.Ю., 2017

***Андрей Михайлович Корженков,*** *доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией палеосейсмологии и палеогеодинамики Института физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН. Область научных интересов — археосейсмология, палеосейсмология, структурная геоморфология, оценка сейсмической опасности.*



***Асмик Ашотовна Варданян,*** *кандидат физико-математических наук, научный сотрудник той же лаборатории. Специалист в области археосейсмологии, магнетизма горных пород, палеомагнетизма.*

***Ритта Юрьевна Стаховская,*** *кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Круг научных интересов охватывает археосейсмологию, гравитационно-механическое и геодинамическое моделирование.*


этот проект, и при ее жизни строительство, продолжавшееся полвека, в 1205 г. завершилось. Вардзиа не имела искусственных укреплений. Крепостной стеной служила скала, внутри которой от чужих глаз надежно укрывался город-монастырь. Кроме религиозной ориентации, он выполнял еще функцию защитную. Монастырь-крепость защищал долину реки от потенциальных атак турок и персов. В военное время здесь находила свое убежище царская семья. С «внешним миром» Вардзию соединяли три подземных выхода.

О происхождении названия города существует легенда. Давно, когда царица Тамара была еще маленькой девочкой, она просто обожала играть в недостроенных пещерах. Однажды в играх принял участие ее дядя, который неожиданно потерял ребенка из вида, и тогда девочка громко и звонко крикнула «Ак вар, дзиа!» — «Я здесь, дядя!». Последние слова этой фразы подхватило эхо и гулким звоном разнесло по всем комнатам каменного города. Это эхо услышал Георгий III и повелел именно так — Вардзиа — назвать строящийся монастырь.

Но ничто не вечно, в конце XIII в. и эта крепость пала — причем пала в прямом смысле слова. Покорили ее не вражеские силы, а куда более мощные — силы природы. В 1283 г. землетрясение разрушило большую часть комплекса. В результате сейсмической катастрофы от скалы отделился и упал в Куру внешний присклоновый пласт породы толщиной до 15 м. Он обнажил большинство внутренних помещений, а многие из них и вовсе разрушил. Скрытыми в толще камня остались лишь несколько внутренних переходов и залов. В одном из них до сих пор чистый холодный источник снабжает водой монахов.

Таким образом, Вардзиа утратила оборонное значение. В конце XIII — начале XIV в., во время правления самцхийского князя Беки Джакели, монастырь восстановили и достроили. Снаружи воздвигли колокольню. В 1551 г. город частично разрушили персы, а через 20 лет пришли турки, и монастырь прекратил свое существование. Турки сожгли живьем всех монахов в его главном храме. В 1828 г. русская армия отвоевала эту область, и монастырь снова начал действовать

Современная Вардзиа — небольшая часть того, что было построено изначально. Землетрясение 1283 г. практически уничтожило пещерный город, и мы видим лишь руины. В сентябре 2004 г. Министерством культуры, охраны памятников и спорта Грузии были проведены работы по реабилитации монастырского комплекса: восстановили отводящие системы и подпорки, удерживающие камни; очистили верхнюю скалу, залечили опасные трещины и остановили процесс их расширения.

## Следы сейсмических деформаций в Вардзии

То, что Вардзию разрушило средневековое землетрясение, ни у кого не вызывает сомнений. А остались ли среди руин следы, позволяющие судить о сейсмических деформациях?

Так как помещения города вырезаны в скальных грунтах, не следует ожидать большого количества «истинных» сейсмических повреждений: наклонов и выдвижений, а также поворотов строи-

Вардзия располагается на левом склоне долины р.Куры.

Здесь и далее фото А.М.Корженкова

Комплекс пещерных сооружений в Вардзии.

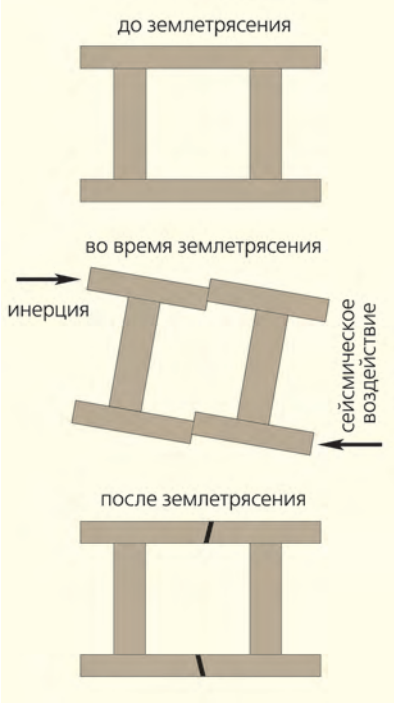
Субмеридиональные трещины над оконными и дверными проемами внутренних комнат пещерного города.

тельных конструкций. Во время сейсмических колебаний в пещерном городе негде проявить себя силе инерции. Особенность Вардзии — большое количество трещин, которые могут быть небольшими. Они разбивают части стен над дверными и оконными проемами, распространяются на потолок и уходят на вертикальные стены. Значительные трещины со смещением секут лестницы и верхние части лестничных маршей. Механизм образования подобных трещин показан на рисунке (см. с.59).

Самые значительные по протяженности трещины наблюдаются близ склона горы Эрушети. Их образование во время средневекового землетрясения и смещение по ним присклонового массива [1] привели к обнажению внутреннего ядра города, скрытого до сейсмической катастрофы от нескромных глаз.

Трещина в колонне, вертикальной стене и на потолке.

Протяженные субширотные трещины со смещением (слева) в присклоновой части Вардзии и трещины, секущие лестницы и пространство над лестничными маршами.




Модель образования трещин над и под входами и оконными проемами.

Субвертикальная стена на южном склоне горы Эрушети, представляющая собой плоскость скольжения скального оползня, который сошел во время землетрясения. У подножия стены лежат каменные блоки — продукты обрушения.

## Где располагался очаг землетрясения XIII века и каков его точный возраст?

В сейсмическом каталоге Е.И.Бюса (1948) мы находим: «1283 г. Сильное землетрясение проявилось в Мцхета. Разрушен кафедральный собор; оно продолжалось понедельник, вторник, субботу и повторилось в Великое воскресенье. В Ацкваре [ныне Ацхури, около Боржоми. — *А.К.*] разрушена церковь. Этим же, вероятно, землетрясением разрушено селение Окона. В области Самцхе землетрясение продолжалось три месяца. Возможно, к ряду землетрясений 1283 г. должно быть причислено землетрясение, имевшее место в Лечхуме, при котором был разрушен Лабечинский монастырь (6 км от Алпаны)». В качестве источника информации Бюс использовал «Каталог землетрясений Российской империи» И.Мушкетова и А.Орлова [2], «Географию Грузии» царевича Вахушти [3] и книгу «Землетрясения в прошлом» М.Джанашвили [4].

В самом полном «Новом каталоге сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.» [5] авторами раздела «Грузия» (В.Г.Папалашвили, И.А.Айвазишвили и О.Ш.Варазанашвили) со ссылкой на летописные материалы [6] приводится нижеследующее описание землетрясения: «Наступила Страстная неделя. В Великую среду сотряслась земля страшно. Потом она сотрясалась еще в четверг, но слабо. Наступила суббота. К 3 ч дня гневом воззрел Господь на Вселенную и сотряс землю с основанием ее так, что развалились церкви и монастыри, превратились в бесформенную массу крепости, дома; горы и холмы высокие смялись, скалы расселись; земля потрескалась и извергла воду, похожую на смолу; высокие деревья валились и качались. Церковь в Акцваре развалилась: Аккурская Богородица покоилась посередине церкви, купол оборвался и, подобно шапке, опустился на нее. Гнев Божий постиг только Самцхе, и землетрясение там длилось на протяжении трех месяцев. Разрушился также Мцхетский храм. В Самцхе погибло множество людей, и нигде не осталось в целости ни храма, ни церкви, ни крепости. Плач и рыдание были неизмеримы». Это же описание используют А.Д.Цхакая и В.Г.Папалашвили в работе «Сейсмические условия Кавказа» [7].

Грузинские авторы дают следующие параметры события: 1275 г., 14 апреля, координаты землетрясения — 42.1°с.ш., 44.2°в.д.; глубина гипоцентра — 28 км, магнитуда $M$ = 6.7, интенсивность сейсмического воздействия $I_0$ = 8–9 баллов (по шкале MSK-64). По мнению исследователей, землетрясение случилось не в 1283 г. (как это указано в каталоге Бюса), а 14 апреля 1275 г. (как это обозначено в летописи). Папалашвили и Цхакая также критикуют В.С.Хромовских [8], который, скорее всего, завысил интенсивность этого землетрясения в эпицентре до 9 баллов.

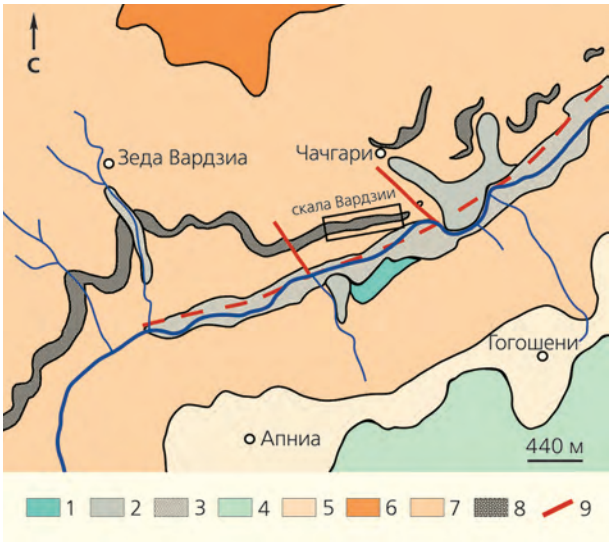
Но из обсуждаемой статьи не ясно, почему авторы помещают эпицентр землетрясения к северу от г.Гори и как они определили глубину очага (28 км) и энергетическую мощность землетрясения. Судя по тому, что разрушались наиболее крепкие, хорошо построенные здания (крепости и монастыри) и происходили значительные изменения рельефа («горы и холмы высокие смялись, скалы расселись»), интенсивность колебаний в эпицентральной области должна действительно быть не менее 9 баллов.

Важно отметить, что, согласно летописям, сейсмические удары продолжались на протяжении трех месяцев. В связи с этим у нас возникает ряд вопросов. Когда же произошел главный удар, какой силы он был и предварялся ли интенсивными форшоками? Насколько были сильны афтершоки и где располагались их эпицентры? Активизировался лишь один сейсмогенерирующий разлом или в «игру» вступили оперяющие или соседние?

Вопросы эти совсем не праздные. Наш опыт изучения сильных землетрясений учит, что при них зачастую активизируется не один разлом, считающийся главным. Так, исследование эпицентральной области Суусамырского землетрясения 1992 г. ($M_s$ = 7.3, $I_0$ = 9–10 баллов) на севере Киргизии показало, что во время сейсмического события произошло вспарывание двух разломов: краевого Суусамырского и предгорного Арамсуйского [9]. Вдоль них образовались сейсмоуступы (выходы сейсмического очага на поверхность), расположенные на расстоянии 25 км друг от друга. Кроме того, главный толчок с $M$ = 7.3 сопровождался сильными афтершоками с $M$ = 6.0–6.5, которые происходили в течение четырех часов после основного землетрясения. Более слабые афтершоки продолжались в регионе несколько лет.

При землетрясении, повредившем Вардзию, по-видимому, имел место аналогичный случай. На территорию древнего города сотрудниками Тбилисского университета имени Ильи Чавчавадзе составлена геологическая карта масштаба 1:10 000. На ней на левом (северном) склоне долины р.Куры показаны активные разломы северо-западного простирания, смещающие все породы — от нижнеплиоценовых андезитовых и дацитовых туфов до современного речного аллювия. Данные разломы — сбросо-сдвиги — обладают правосдвиговой составляющей. Северо-восточное их крыло опущено и сдвинуто к юго-востоку. Любопытно, что разломы доходят до русла реки и там обрываются. Нет никаких признаков их продолжения на правый берег долины.

Осмелимся предположить, что такое поведение вышеописанных структур можно объяснить лишь в единственном случае. Они должны упираться в еще один разлом перпендикулярного простирания, который проходит прямо под руслом Куры и не виден из-за современных отложений реки. У нас есть косвенные свидетельства такого разлома. Он, по-видимому, представляет собой не единичную плоскость разрыва, а целую разломную зо-

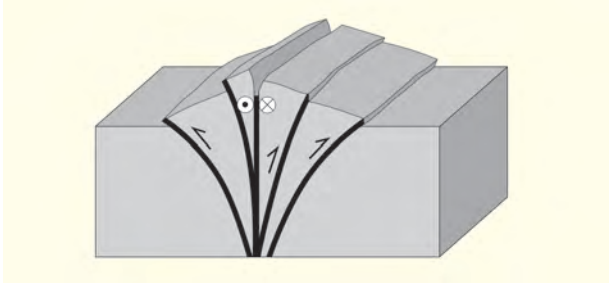



Схематическая геологическая карта района Вардзии и ее окрестностей (по материалам Тбилисского университета имени Ильи Чавчавадзе, с изменениями и дополнениями). 1–3 — современные отложения: 1 — делювиальные и оползневые, 2 — пролювиальные, 3 — аллювиальные; 4 — нижнечетвертичные базальтовые слои, с оливинами и долеритами; 5 — верхнеплиоценовые—нижечетвертичные базальты, долериты, андезит-базальты, песчаники и глины; 6 — нижнеплиоценовые андезиты, андезит-дациты, дациты и риолиты; 7 — верхнемиоценовые—нижнеплиоценовые андезит-дацитовые вулканические брекчии и туфы, андезитовые потоки; 8 — нижнемиоценовые спекшиеся туфы андезит-дациотового и дацитового состава (игнимбриты); 9 — активные разломы. Красным штрихом показана трасса предполагаемого разлома по р.Куре.

ну. Последняя может состоять из нескольких (многих) разрывных плоскостей, которые разделяются нераздробленными участками пород.

Мы уже упоминали о трещинах со смещением в пещерном городе. Они простираются параллельно склону и долине реки. Если по ним происходят тектонические смещения, то правильнее такие структуры называть разрывами. В данном случае они входят в состав Куринской разломной зоны. Более того, эти разрывы составляют так называемую цветковую зону. Она хорошо видна в одной из лестниц в восточной части пещерного города. Проблема образования цветковых структур не раз обсуждалась с нашими коллегами. Мы искренне признательны профессору Самире Филип (Франция) за участие в таких дискуссиях и ценные советы.

Неудивительно, что река Кура течет по зоне разлома. Почти все крупные реки мира (и особенно в горных областях) наследуют имеющуюся



Блок-диаграмма, отображающая цветковую структуру, которая возникает в верхней части земной коры в зоне крупных сдвигов. Стрелки показывают направление смещения по разломным плоскостям. Кружок с точкой означает движение блока по разлому по направлению к читателю, кружок с крестиком — от читателя.

Небольшие разрывы со смещением в присклоновой части пещерного города Вардзиа, составляющие цветковую структуру. Слева — общий вид. Трещины-разрывы не только в лестнице, но и выше, и ниже нее. Справа — увеличенный фрагмент. Присклоновая разбитая часть лестницы выше, чем центральная часть, что противоречит действию сил гравитации.

разломную сеть. Мы не можем сейчас уверенно сказать, в каком году и где произошел главный толчок средневекового землетрясения. Однако совершено точно во время серии древних трехмесячных землетрясений активизировалась и Куринская разломная зона. В то время произошло смещение по нескольким ее разрывам. Значительный (мощностью до 15 м!) присклоновый пласт породы рухнул вниз, обнажив внутреннюю структуру города-монастыря, города-крепости. После этого события Вардзиа стала легкой добычей для недружественных соседей-захватчиков.■

**Проведенные исследования выполнены при поддержке программы «НАТО для мира и безопасности» (проекты 983142 и 983284).**

## Литература / References

1. *Margottini C., Corominas J., Crosta G.B. et al.* Landslide Hazard Assessment, Monitoring and Conservation of Vardzia Monastery Complex. Engineering Geology for Society and Territory. 2015; 8: 293–297.
2. *Мушкетов И., Орлов А.* Каталог землетрясений Российской Империи. Записки Русского географического об-ва. XXVI. СПб., 1983. [*Mushketov I., Orlov A.* Catalog of Earthquakes of the Russian Empire. Notes of Russian Geographic Society. XXVI. SPb., 1983. (In Russ.).]
3. Царевич Вахушти. География Грузии. Перевод М. Джанашвили. Зап. Кавк. отд. Русск. геогр. об-ва. Книжка XXIV. Вып.5. Тифлис, 1904. [Prince Vakhushti. Geography of Georgia. Translation by M.Dzhanashvili. Notes of Caucasus Department of Russian Geographic Society. Book XXIV. Issue 5, Tiflis, 1904. (In Russ.).]
4. *Джанашвили М.* Землетрясения в прошлом. Историческая справка. Изв. Кавк. отд. Русск. геогр. об-ва. XV. Тифлис, 1902. [*Dzhanashvili M.* Earthquakes in the Past. Historical References. Proceedings of Caucasus Department of Russian Geographic Society. Book XV. Tiflis, 1902. (In Russ.).]
5. *Шебалин Н.В., Кондорская Н.В.* Новой каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М., 1977. [*Shebalin N.V., Kondorskaya N.V.* New Catalog of the Strong earthquakes in the USSR Territory from Ancient Tien until 1975. Moscow, 1977. (In Russ.).]
6. Картлис цховреба. Летопись. Тбилиси, 1959. [Kartlis Tskhovreba. Cronicle. Tbilisi, 1959. (In Russ.).]
7. *Цхакая А.Д., Папалашвили В.Г.* Сейсмические условия Кавказа. Тбилиси, 1973. [*Tskhakaya A.D., Papalashvili V.G.* Seismic State of the Caucasus. Tbilisi, 1973. (In Russ.).]
8. *Хромовских В.С.* Сейсмотектоника Прибайкалья и Большого Кавказа. Автореф. дисс. на соискание степени докт. г.-м.н. Иркутск, 1975. [*Khromovskikh V.S.* Seismotectonics of the Baykal Lake region and Greater Caucasus.Author-issue of Doctor Dissertation. Irkutsk, 1975. (In Russ.).]
9. *Богачкин Б.М., Корженков А.М., Мамыров Э. и др.* Структура очага Суусамырского землетрясения 1992 г. на основании анализа его геологических и сейсмологических проявлений. Физика Земли. 1997; 11: 3–18. [*Bogachkin B.M., Korzhenkov A.M., Mamyrov E. et al.* The Structure of 1992 Susamyr Earthquake Source Based on Its Geological and Seismological Manifestations. Physics of the Solid Earth. 1997; 33(11): 867–882.]

## Traces of earthquake in Vardzia cave city

A.M.Korzhenkov[1], A.A.Vardanyan[1], R.Y.Stakhovskaya[1]
[1]*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS (Moscow, Russia)*

The article describes the deformations in the cave city Vardzia, Southern Georgia historical monument of the XII—XIII centuries. The construction of the cave city with numerous buildings, royal chambers, churches, and the monastery was held specially to hide it from the worst enemies, the Persians and the Ottomans. However, as a result of a strong earthquake in the late XIII century, the near-surface layer of the mountainside, that hid the city, collapsed, and all the internal structures were exposed. Until now, the exact year of the seismic catastrophe and the position of its hypocenter, are not known. Our researches in Vardzia found seismogenic fissures in the walls of the caves buildings and also the development of the so-called flower structure. This structure unequivocally indicates the seismic source of the ancient earthquake in the cave city, near the slip plane of a huge ancient landslide. There are also active faults of the north-western strike, which shift the Quaternary sediments of the river Kura, flowing at the foot of the rock complex. We assume that there is an active fault structure along the valley of the river that was hidden seven centuries after the earthquake by river sediments. Georgian seismologists, however, denote the epicenter of the mentioned earthquake in 100 km northeast from Vardzia, near the city Gori. It is possible that during the ancient seismic event (which lasted, by the way, three months), several seismogenic ruptures occurred on a large area of southern and central Georgia. Thus, the study of the parameters of a strong earthquake in the XIII century is still only at the very beginning. Archeo-, paleo- and historical-seismological studies in the region should be continued for a more correct assessment of the seismic hazard of the Republic of Georgia.

**Keywords**: Georgia, Vardziya, cave cities, ancient earthquakes, active faults, flower structure, seismic deformation.

# Золото и органическое вещество земной коры

доктор геолого-минералогических наук Л.Я.Кизильштейн
*Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)*

В статье приведены аргументы в пользу химического и биохимического взаимодействия золота с органическим веществом биосферы. Эти взаимодействия определяют процессы переноса и концентрирования золота при образовании месторождений. В качестве примера рассматривается золото в черных сланцах, с которыми связаны крупнейшие месторождения этого элемента. Накопление золота происходит и в процессах химических взаимодействий с гуминовыми кислотами растительного происхождения, бактериальной редукции сульфатов и при потере органического вещества в результате метаморфизма.

**Ключевые слова:** золото, органическое вещество, месторождение, сульфиды, черные сланцы.

Роль органического вещества (ОВ) в образовании месторождений металлов давно отмечена и исследована геологами и геохимиками. Было выяснено, что металлы связаны с ископаемым ОВ, во-первых, в результате того, что еще при жизни многие организмы, водоросли и наземные растения накапливают его в тканях и клетках. Во-вторых, после того как организмы погибают, ОВ становится химическим реагентом, способным вступать в реакции с металлами, которые находятся в окружающей природной среде.

Образец черного сланца с линзой золотистого пирита ($FeS_2$). Размер образца по длинной оси 13 см.

Вопрос о связи металлов с ископаемым ОВ представляет не только познавательный интерес, но имеет и вполне практическое значение, поскольку именно эта связь привела к формированию промышленных месторождений урана, германия, многих полиметаллических руд. В последние годы стала очевидной экологическая роль металлов, входящих с ОВ в состав горючих полезных ископаемых (углей, нефти, сланцев). Содержащиеся в них металлы выбрасываются в атмосферу с дымовыми газами, становясь серьезным фактором загрязнения природной среды [1]. Теме «Металлы и органическое вещество» посвящено много отечественной и зарубежной литературы. У ее истоков стоят классические труды академика В.И.Вернадского.

Органическое вещество земной коры принимает участие и в формировании месторождений золота. Это можно иллюстрировать на примере золотоносности черных сланцев. Так называют осадочные горные породы, которые состоят в основном из минералов глин и органического вещества, содержащегося в них в количестве от десятых долей до 2–3%, а иногда и более. Образовано оно преимущественно остатками водорослей (сапропелевое ОВ — по терминологии, принятой в органической геохимии). Темный, часто почти черный цвет таких сланцев обусловлен присутствием коллоидного моносульфида железа ($FeS{\cdot}nH_2O$), который окрашивает породу в черный цвет даже при очень малых его концентрациях. Обычные компоненты черных сланцев также — пирит ($FeS_2$), разрозненные фрагменты раковин моллюсков, скелетов рыб и тканей высших растений. Черные сланцы при-

© Кизильштейн Л.Я., 2017

сутствуют в осадочных формациях возрастом от архея до голоцена.

Среднее (кларковое) содержание золота в черных сланцах около 8 мг/т [2], т.е. примерно вдвое выше, чем в осадочных породах земной коры. Оно, как правило, находится в дисперсном (рассеянном) состоянии. Размер отдельных золотинок — от долей до нескольких десятков микрометров. Концентрация их меняется от слоя к слою, что указывает на накопление в осадочном процессе. Частицы имеют разнообразную прихотливую форму. По сумме генетических (фациальных) признаков черные сланцы представляют собой донные отложения морей, лагун или озер, накопившиеся в условиях дефицита кислорода (восстановительной геохимической среды).

Золото, о котором пойдет речь, связанное с периодом осадконакопления, можно обозначить как первичное, а оказавшееся в черных сланцах в результате более поздних геологических процессов (тектонических и гидротермальных) — вторичное. Как правило, от поры формирования первичного оно отделено более или менее значительными промежутками времени.

Пласты сланцев (и в их составе первичное Au) распространены без перерыва на больших территориях. Вторичное же золото накапливается в черных сланцах, когда они под влиянием метаморфизма из осадка превратились уже во вполне сформированную горную породу. Геологические процессы накопления вторичного Au локальны. Чаще всего оно тяготеет к тектоническим нарушениям. Таким образом, разделение золота сланцев на первичное и вторичное с генетической точки зрения вполне оправдано.

С черными сланцами связаны крупнейшие мировые месторождения Au: Сухой Лог (Забайкалье, Россия), Карлин (США), Витватерсранд (ЮАР), Кумтор (Киргизия), Мурунтау (Узбекистан). Последнее по запасам золота — 6 тыс. т — относится к категории «супергигантов». Мировые ресурсы Au в черных сланцах оцениваются огромной цифрой — примерно 50 тыс. т.

Источником первичного Au в сланцах служат размываемые магматические породы. Способ переноса золота от зоны размыва к месту отложения в водном бассейне — принципиально важный элемент гипотез формирования первичного золота, так как вследствие высокой плотности этого драгоценного металла перенос осуществляется преимущественно в виде растворенных соединений [3, 4], например, иона хлороурата [$AuCl_2$]. В сероводородной (восстановительной) среде хлороурат разрушается с образованием свободного золота, которое может сорбироваться глинистым материалом осадка или органическим веществом [5].

Эффективная форма переноса растворенного золота — комплексные соединения с гуминовой кислотой, образующейся в природе в результате биохимического разложения растительных тканей. Гуминовая кислота — главный компонент природных процессов, ведущих к образованию органоминеральных соединений, в том числе и ОВ с золотом [4]. Примером, подтверждающим реальность описываемой формы переноса, служит золоторудное месторождение Карлин, в котором более 50% металла находится в виде гуминовых соединений. В свое время это оказалось препятствием для извлечения Au из руды методом цианирования. Существенное обогащение руды было достигнуто при разрушении комплексов щелочной обработкой.

Мельчайшие (микрометры и доли микрометра) частицы Au, образующиеся при размыве золотосодержащих пород или разрушении растворенных химических соединений, могут транспортироваться водой как истинные растворы.

Таким образом, Au вместе с минеральным материалом и растворенными соединениями оказываются в составе донных отложений, образующих черные сланцы. Золото в этих осадках (будущих пластах сланцев) распределяется в соответствии с палеогеографическими особенностями периода осадконакопления: рельефом дна бассейна, в котором происходит накопление осадочного материала, ориентировкой подводных течений, положением зон размыва и др. При преобразовании донных отложений (по геологической терминологии, син- и диагенез осадка) первичное рассеянное Au может концентрироваться как изоморфная примесь в кристаллической решетке пирита или других сульфидных минералов, например, арсенопирита (FeAsS).

Напомним, сульфиды в донных отложениях образуются в результате химического взаимодействия сероводорода с ионами металлов. В случае пирита — с ионом двухвалентного железа. Сероводород в осадке представляет собой продукт жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий [6]. Биохимия этого процесса и его геологические последствия подробно исследованы [7, 8].

В пирите концентрация Au может оказаться более высокой, чем в окружающем осадке, и достигать нескольких десятков граммов на тонну породы. Подобный золотоносный пирит во многих случаях становится основным минералом, определяющим качество сланцев как руды. Содержание золотоносных пиритов на месторождении Сухой Лог составляет 2–10%, а золота в руде — 3–15 г/т (кстати, промышленные запасы этого месторождения около 2 тыс. т Au). Накопление первичного Au в сульфидах, по существу, — следствие участия в процессе живого ОВ.

В черных сланцах золото концентрируется путем химического взаимодействия с неживым (косным) ОВ. Примером этого служат упомянутые выше Au-гуминовые комплексы.

Растворенное Au может накапливаться в ОВ морских организмов, способных извлекать его из природных вод. По сравнению с морской водой

концентрация золота в водорослях увеличивается в тысячи раз. По словам В.И.Вернадского: «Мы встречаемся на этом этапе геохимии Au с проявлением концентрационной функции живого вещества» [9].

Кроме того, важные геохимические последствия накопления Au в ОВ состоят в следующем. В ископаемом состоянии под воздействием метаморфизма (температуры и давления земных недр) ОВ может терять значительную (до 90%) долю своей начальной массы [10]. Это увеличивает концентрации содержащихся в нем минеральных примесей. В том числе подобное «вторичное обогащение» приводит к образованию высоких концентраций Au, установленных в ОВ черных сланцев.

Обсуждая проблему начального накопления первичного Au в сланцах, необходимо иметь в виду периодическое увеличение содержания золота в гидросфере Земли (и, следовательно, в обитающих в океане организмах и в геохимической среде). Вопрос о причинах подобного глобального варьирования концентраций не только золота, но и других химических элементов (например, урана) обстоятельно рассматривается в работах С.Г.Неручева [10].

Таким образом, участие ОВ в накоплении первичного Au в черных сланцах представляется вполне реальным. Более того, если принять во внимание биогенное происхождение золотоносных сульфидов, то необходимо заключить, что участие ОВ (во всяком случае, его части) должно быть распространено и на стадию формирования промышленной золотоносности сланцев.

Позднейшие геологические процессы часто до неузнаваемости изменяли облик, состав и условия залегания горных пород, слагающих месторождения Au в черных сланцах. Это нашло отражение и в генетической номенклатуре месторождений. В качестве примера: генетический тип упоминавшегося выше месторождения Сухой Лог определяется как золотосульфидный, вкраплено-прожилковый. Роль и геохимическая судьба первичного Au, часто оказывается забытой или отодвинутой на задний план. ■

## Литература / References


1. *Кизильштейн Л.Я.* Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов-на-Дону, 2002. [*Kizelstein L.Ya.* Ecogeochemistry of elements-impurity in coals. Rostov-on-Don, 2002. (In Russ.).]
2. *Юдович Я.Э.* Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург, 1994. [*Yudovich Ya.E.* Elements-impurity in black shale. Yekaterinburg, 1994. (In Russ.).]
3. *Хорн Р.* Морская химия. М., 1972. [*Horn R.* Sea chemistry. Moscow, 1972. (In Russ.).]
4. *Манская С.М., Дроздова Т.В.* Геохимия органического вещества. М., 1964. [*Manskaya S.M., Drozdova T.V.* Geochemistry of organic matter. Moscow, 1964. (In Russ.).]
5. *Пешевицкий Б.И., Аношин Г.Н., Еренбург А.М.* О химических формах золота в морской воде. ДАН СССР. 1965; 162(4): 915–917. [*Peshevitsky B.I., Anoshin G.N., Ehrenburg A.M.* On the chemical variaties of gold in sea-water. DAN of the USSR. 1965; 162(4): 915–917. (In Russ.).]
6. *Кизильштейн Л.Я.* Сульфатвосстанавливающие бактерии: великие дела маленьких существ. Природа. 2016; 2: 51–53. [*Kizelshtein L.Ya.* Sulfate-Reducing Bacteria: Great Things Small Creatures Do. Priroda. 2016; 2: 51–53. (In Russ.).]
7. *Волков И.И.* Геохимия серы в осадках океана. М., 1984. [*Volkov I.I.* Sulfur geochemistry in ocean sediments. Moscow, 1984.]
8. Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека. М., 1983. [Global biogeochemical cycle of sulfur and influence of activity of the person on him. M, 1983. (In Russ.).]
9. *Вернадский В.И.* Проблемы биогеохимии. Тр. Биогеохимической лаборатории Ин-та геохимии им.В.И. Вернадского. 16. М., 1940. [*Vernadsky V.I.* Biogeochemistry problems. Proceedings of Biogeochemical laboratory of Vernadsky geochemistry institute. 16. Moscow, 1940. (In Russ.).].
10. *Неручев С.Г.* Уран и жизнь в истории Земли. Л., 1982. [*Neruchev S.G.* Uranium and life in the history of Earth. Leningrad, 1982. (In Russ.).]


## Gold and organic matter in the Earth crust


L.Ya.Kizelshtein
*Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)*



In the article arguments in favor of chemical and biochemical interactions of gold with organic matter of the biosphere are adduced. These interactions define processes of transfer and concentration of gold during deposits' formations. Gold in the black shales with which the largest deposits of this element are connected is considered as an example. Accumulation of gold occurs also during chemical interactions with phytogenic humic acids, bacterial reduction of sulfates, and at loss of organic matter as a result of metamorphism.



**Keywords:** gold, organic matter, field, sulfide, black shale.

# Паук–серебрянка выходит из воды?

кандидат биологических наук К.Г.Михайлов[1], П.Р.Ноговицын[2]
[1]*Зоологический музей Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)*
[2]*Ойская средняя школа имени А.В.Дмитриева (село Ой, Хангаласский улус, Республика Саха (Якутия), Россия)*

По материалам из Якутии описан уникальный случай массового выхода молодых пауков-серебрянок (*Argyroneta aquatica*) из водоема и строительства ими сетей на окружающей растительности. Обсуждаются похожие феномены у других пауков.

**Ключевые слова:** Aranei, пауки, биология, паутинные сети, Якутия.

Как и положено хищным животным, пауки в подавляющем большинстве живут поодиночке, соединяясь парами только на период размножения. Колониальные формы известны буквально для нескольких десятков из более чем 45 тыс. описанных к настоящему времени видов. Большинство колониальных форм обитает в тропических странах. Колониальность проявляется в первую очередь в совместном проживании больших групп, которые, как правило, питаются все-таки раздельно. Совместные охота и питание добычей наблюдаются лишь у нескольких видов; наиболее исследован в этом отношении небольшой паучок *Anelosimus eximius* (семейство Theridiidae), живущий в Южной Америке.

Самка паука-серебрянки.

Фото Й.Лисснера (Дания)

Выдвинуто две гипотезы происхождения колониальности у пауков. Одна из них предполагает скопление и кооперацию взрослых особей вокруг изобильного пищевого ресурса, когда еды хватает всем и нет особых причин для проявления агрессивности к соседям. Согласно второй гипотезе, потомство одной самки, подрастая, не расселяется, а продолжает жить совместно. Возможно, обе эти гипотезы применимы к разным видам колониальных пауков.

На территории России и сопредельных стран колониальные пауки не обитают. Но в южных регионах неоднократно были отмечены скопления пауков-кругопрядов (семейство Araneidae) на побережьях водоемов. Они, скорее всего, связаны с массовым выплодом каких-то мелких летающих насекомых, которыми эти пауки питаются. На побережье о.Балхаш описаны скопления *Araneus pallasi* [1], а на берегу Каспийского моря, к северу от Красноводска, — *Larinioides folium* [2]. Летом 2012 г. в г.Ейске на побережье Азовского моря К.Г.Михайлову удалось наблюдать скопление пауков *L.folium* на растительности и стенах построек, расположенных на Ейской косе в непосредственной близости от моря. Такая концентрация была связана с ежегодным массовым лётом комара-звонца (*Chironomus plumosus*, семейство Chironomidae). Сотрудники санатория едва успевали обметать паутину, чтобы не пугать отдыхающих...

© Михайлов К.Г., Ноговицын П.Р., 2017

Однако есть пауки, массовые скопления которых трудно представить, тем более на суше. Это водяной паук-серебрянка (*Argyroneta aquatica*), единственный из пауков, весь жизненный цикл которого проходит в пределах пресного водоема. Серебрянки — это пример вторичного возвращения паукообразного в водную среду, не очень характерного для представителей этого класса. Из других арахнид перешли к постоянному обитанию в воде только водяные клещи, встречающиеся как в пресных, так и в соленых водах. Серебрянка широко распространена в Северном полушарии, в России и сопредельных странах встречается повсеместно, отмечена даже в немногочисленных водоемах пустынной зоны Средней Азии. В некоторых странах серебрянка редка; например, в Японии этот вид внесен в Красную книгу еще в 1995 г. Опишем кратко биологию этого замечательного паука [3, 4].

Молодая серебрянка, оз.Балатон.
Фото В.Пфлигера (Германия)

## Биология серебрянки

Серебрянка, как и все пауки, дышит атмосферным воздухом. Дыхательная система пауков двойственна по своей природе: работают как легкие, так и развитая трахейная система. Но у водяного паука легкие малоактивны и функционируют в первую очередь трахеи. Водоотталкивающие волоски на брюшке паука удерживают слой воздуха, которым и дышит паук под водой. Именно из-за серебристого подводного пузыря вокруг брюшка паук получил свое имя, как латинское, так и русское. Для постоянного проживания под водой серебрянка строит подводный колокол из паутинных нитей, в котором удерживается пузырь атмосферного воздуха. Нити паутины прикреплены к окружающей подводной растительности. Выделяемый пауком углекислый газ растворяется в окружающей воде, а кислород надо постоянно подносить с поверхности воды. Для перемещения воздушного пузыря с брюшка в колокол паук использует четвертую пару ног. Подводные колокола нужны серебрянке для проживания в теплое время года, спаривания и размножения, поедания добычи и зимовки. Колокол для зимовки наиболее прочен, его стенки подчас непрозрачны, в отличие от стенок летнего жилища, которое устроено менее надежно и часто дополнительно прикрепляется к окружающим водорослям. Серебрянка способна зимовать в толще льда, вмерзая туда вместе с колоколом или другим укрытием, например пустой раковиной пресноводного моллюска.

Давно известно, что колокол серебрянки служит своеобразной «физической жаброй»: туда из толщи воды проникает кислород (см. одну из последних экспериментальных работ [5]). По этой причине паук может сидеть внутри колокола целые сутки, не поднимаясь к поверхности воды за новым пузырем воздуха. Частое механическое наполнение колокола необходимо в первую очередь в бедной кислородом воде и для пузырей малого размера.

Серебрянка живет в стоячих и слабопроточных водоемах. Она ловит добычу с помощью паутинных нитей, расположенных рядом с колоколом. Эти нити выполняют в первую очередь сигнальную функцию. Устройство сети довольно примитивно и представляет собой отклоняющийся вариант воронковидной сети, которую строят ее сухопутные родственники из семейств Agelenidae, Cybaeidae и некоторых др. (Раньше всю эту группу пауков объединяли в семейство Agelenidae, теперь говорят об «агеленоидном комплексе» семейств.) Ниже мы опишем, какие постройки серебрянка способна строить на берегу.

Для пауков агеленоидного комплекса, к которым относится и серебрянка, характерно нетипичное в целом для отряда пауков явление: самцы здесь немного крупнее самок. В подавляющем большинстве семейств пауков мы наблюдаем как раз обратное явление: самки крупнее самцов. Иногда говорят даже о карликовости самцов и гигантизме самок (например, у тропических пауков-кругопрядов рода *Nephila*). Заинтересованный в спаривании самец строит свой колокол рядом с колоколом самки. Взаимоотношения между полами у водяного паука довольно агрессивные*. При удачном спаривании самец остается в колоколе самки какое-то время, иногда до нескольких часов, ожидая, когда самка приступит к постройке яйцевого кокона. В остальное время самцы и самки серебрянки живут раздельно, каждый в своем колоколе. Самцы, как водится, более активны и проводят больше времени вне своего жилища.

* Сцена сражения самца и самки ярко описана в прекрасной детской научно-популярной книге Я.Ларри «Приключения Карика и Вали».

В какой-то момент (в промежутке от середины весны до конца лета) самка серебрянки откладывает в яйцевой кокон от 70 до 130 яиц [4], из которых вылупляются личинки, которые живут вместе с матерью 2-4 недели, вплоть до четвертой линьки. После этого молодые паучки начинают жить самостоятельно, приступая к постройке собственных маленьких «колокольчиков».

Водяной паук охотится под водой, сидя в своем колоколе, как в засаде. Поймав добычу, паук возвращается в колокол, где происходит высасывание жертвы и внекишечное пищеварение, невозможные в толще воды. Наиболее активная охота происходит в ночное время суток.

Краевая часть сети *Agelena labyrinthica*. Франция.
Фото Ж.-Ф.Таберле (Франция)

## Серебрянки на суше

В рамках постоянно действующей (с 1994 г.) школьной экспедиции «Эллэйаада» группа школьников Ойской средней школы под руководством П.Р.Ноговицына проводила наблюдения с 1 по 21 июня 2010 г. Место работ — Якутия, окрестности села Ой Хангаласского улуса (района), долина Эркээни р.Лена, около маленького озерца (площадь 0.5 га) на краю маленького лиственнично-березового лесочка (координаты местности: 61.550°с.ш., 129.153°в.д.) Озерцо возникло сравнительно недавно при прокладке автомобильной трассы Покровск—Якутск, которая перегородила небольшую низинку. Озерцо не имеет родников и впадающих ручьев, наполняется только талой водой. Экспедиция 2010 г. была посвящена изучению биологии земноводного — сибирского углозуба (*Salamandrella keyserlingii*). При этом было обнаружено, что какие-то, первоначально неопознанные, пауки в массовом количестве плели паутину на траве и кустарниках по берегу водоема. Пауков было столь много, что они строили целые полотнища паутины.

Начало строительства наземной сети серебрянки. 1 июня 2010 г.

Здесь и далее фото школьной экспедиции «Эллэйаада»

Анализ многочисленных фотографий показывает, что паутина, несомненно, построена молодыми серебрянками, по какой-то причине в массе вышедшими из водоема. По присланному в 2010 г. экземпляру определение паука было подтверждено доктором биологических наук Ю.М.Марусиком из Института биологических проблем Севера ДВО РАН (Магадан). Очевидно, паучки вылупились из яиц, отложенных серебрянками-родителями весной того года. Изобилие молоди свидетельствует о большом количестве взрослых серебрянок, удачно перезимовавших в водоеме. Трудно предположить причину, по которой паучки, подобно леммингам, массово покинули привычную среду обитания. Скорее всего, число молодых серебрянок оказалось столь велико, что им стало явно не хватать пищевого ресурса. С другой стороны, паучки могли, подобно щукам, питаться своими меньшими собратьями... Так или иначе, их дыхательная система позволяет существовать на суше, а ноги с вполне сухопутно устроенными лапками «не забыли» способы передвижения вне воды, как это умели делать их предки.

Край водоема, обильно заплетенный паутиной серебрянки. 12 июня 2010 г.

Просматривая фотографии, можно видеть, что группы молоденьких серебрянок строят вокруг вершин прибрежных растений что-то вроде огромных куполов, напоминающих увеличенные в десятки и даже сотни раз индивидуальные подводные постройки. Хотя такая аналогия, конечно, довольно поверхностна. Структура наземной паутины серебрянок очень похожа на постройки других воронковых пауков, живущих вне водоемов, например лабиринтовой агелены *Agelena labyrinthica*, обычной в степной зоне европейской части России. Это хорошо видно при сравнении фотографий из Якутии (паутина серебрянки) и Франции (паутина агелены).

Что произошло позднее — мы можем только гадать. Наиболее вероятно, что все серебрянки, вышедшие на сушу, погибли, подвергшись нападению других хищных членистоногих или птиц либо не сумев найти в несвойственной для себя среде достаточного пропитания. Уже на фотографиях, сделанных 19 июня 2010 г., видны явные повреждения ранее построенной паутины. К 21 июня количество повреждений еще более возросло, и фотографирование «некрасивых» паутинных построек прекратили. Возможно, какая-то небольшая часть паучков вернулась

Высокий кустарник, заплетенный сетью серебрянки. 12 июня 2010 г.

обратно в водоем. Так или иначе, мы имеем дело с редчайшим явлением в жизни вида, и необходимо продолжать регулярные наблюдения.

Уровень воды в небольшом водоеме, на берегу которого были произведены наблюдения, изменчив. Например, в 2017 г. Ноговицын обнаружил, что озерцо полностью пересохло, и никаких следов серебрянок найдено не было.

Наземная паутина была отмечена и в пустынной зоне Казахстана, где паук-серебрянка найден в прибрежных сообществах (преимущественно в зарослях рогоза и тростника) в пойме р.Или [6]. Однако, к сожалению, никакими материалами и последующими наблюдениями это сообщение не было подтверждено. Более того, авторы пишут, что местами паук «встречается большими скоплениями, строго соблюдая промежутки между ловчими сетями». Подобное, скорее, характерно для пауков-крестовиков, упомянутых в начале нашей статьи. Поэтому достоверность определения паука в данном случае вызывает сомнение.

* * *

Приведенные материалы свидетельствуют, что далеко не все ясно даже в такой традиционной и хорошо разработанной науке, как зоология. В жизни паука-серебрянки описано настолько необычное явление, что арахнологу-специалисту хочется развести руками или пожать плечами. Случай этот пока единичный. Но будем надеяться, что наша публикация привлечет внимание натуралистов широкого профиля, которые смогут предоставить новые данные, которые прольют свет на природу этого удивительного феномена.■

*Авторы благодарны доктору биологических наук Ю.М.Марусику (Магадан, Россия) за консультацию, европейским арахнологам Й.Лисснеру (J.Lissner, Дания), В.Пфлигеру (W.Pflieger, Германия) и Ж.-Ф.Таберле (J.-Ph.Taberlet, Франция) за любезно предоставленные фотографии, а также В.В.Глупову (Новосибирск, Россия) за уточнение определения комара-звонца из Азовского моря.*

**Работа выполнена в рамках гостемы МГУ имени М.В.Ломоносова «Таксономический и биохорологический анализ животного мира как основа изучения и сохранения структуры биологического разнообразия» (АААА-А16-116021660077-3).**

## Литература / References

1. *Мариковский П.И., Марусик Ю.М. Araneus pallasi* (Aranei: Araneidae) — общественный паук фауны СССР. Вестник ЛГУ. 1985; 17: 3–8. [*Marikovsky P.I., Marusik Yu.M. Araneus pallasi* (Aranei: Araneidae) — social spider in the fauna of the USSR. Vestnik of Leningrad State University. 1985; 17: 3–8. (In Russ.).]
2. *Панов Е.Н., Михайлов К.Г.* Колониальное поселение паука-крестовика *Araneus folium* (Aranei, Araneidae) в Западном Туркменистане. Вестник зоологии. 1996; 3: 61–62. [*Panov E.N., Mikhailov K.G.* The colonial settlement of an orb-web spider *Araneus folium* (Aranei, Araneidae) in Western Turkmenistan. Vestnik zoologii. 1996; 3: 61–62. (In Russ.).]
3. *Crome W.* Die Wasserspinne. Die Neue Brehm-Bucherei. Heft 44. Leipzig, 1951.
4. *Кудринская О.И.* Питание *Argyroneta* и некоторые черты их биологии. Труды Московского технического института рыбной промышленности и хозяйства. 1955; 7: 172–203. [*Kudrinskaya O.I.* Feeding of *Argyroneta* and some aspects of their biology. Trudy of the Moscow technical institute of fishing industry and economy. 1955; 7: 172–203. (In Russ.).]
5. *Seymour R.S., Hetz S.K.* The diving bell and the spider: the physical gill of *Argyroneta aquatica*. Journal of Experimental Biology. 2011; 214 (13): 2175–2181.
6. *Чилдибаев Д., Кащеев В.А., Ахметбекова Р.Т.* Фауна энтомофагов основных мест выплода кровососущих двукрылых в пойме реки Или. Паразитические клещи и насекомые Казахстана. Труды Института зоологии АН Казахской ССР. Т.42. Алма-Ата, 1985: 59–77. [*Childibaev D., Kashcheev V.A. Akhmetbekova R.T.* Fauna of entomophages of the main birthplaces of blood-sicking flies in a flood plain of the river Ili. Trudy of Institute of zoology of the Kazakh SSR Academy of Science. V.42. Alma-Ata, 1985: 59–77. (In Russ.).]

## Water spider comes out of the water?

K.G.Mikhailov[1], P.R.Nogovitsyn[2]
[1]*Zoological Museum of the Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)*
[2]*A.V.Dmitriev Oyskaya School (Oy, Khangalasskiy Ulus, Sakha (Yakutia) Republic, Russia)*

A unique case of mass dispersion of young water spiders *Argyroneta aquatica* out of water body and construction of webs on surrounding vegetation in Yakutia is described. Similar phenomena for other spiders are also discussed.

**Keywords:** Aranei, spiders, natural history, spider webs, Yakutia.

# Кувыркающиеся железомарганцевые конкреции на дне Финского залива

кандидат геолого-минералогических наук В.Г.Колокольцев,
*Всероссийский геологический институт имени А.П.Карпинского (Санкт-Петербург, Россия)*

Онтогенический анализ позволил выделить разновидности железомарганцевых конкреций (ЖМК) Финского залива, эволюция которых сопровождалась их многократными перемещениями по дну водоема. Предполагается, что причиной прыжков и вращательных движений ЖМК были не только придонные течения и неровности дна бассейна, но и процессы формирования покмарков — кратероподобных форм подводного рельефа в местах разгрузки восходящих газово-жидких флюидов.

**Ключевые слова:** железомарганцевые конкреции (ЖМК), кольцевые конкреции, универсальный закон симметрии, онтогенический анализ, покмарки.

Железомарганцевые конкреции (ЖМК) на дне морей и океанов впервые обнаружили около 200 лет назад, а их континентальные гомологи (в озерах и болотах) были известны нашим предкам еще на ранних стадиях железного века. На Русской равнине их вычерпывали из болот и озер и использовали как железную руду. В России последние железоделательные заводы, работавшие на болотных рудах, закрылись в начале XX в. Прошло 100 лет, и у нас вновь, с целью промышленного извлечения диоксида марганца, обратились к ЖМК, но не к болотным, а залегающим на дне Финского залива. Этим планам не суждено было сбыться, но в память о них сохранилась коллекция конкреций, собранная при работах по подсчету их запасов в Финском заливе.

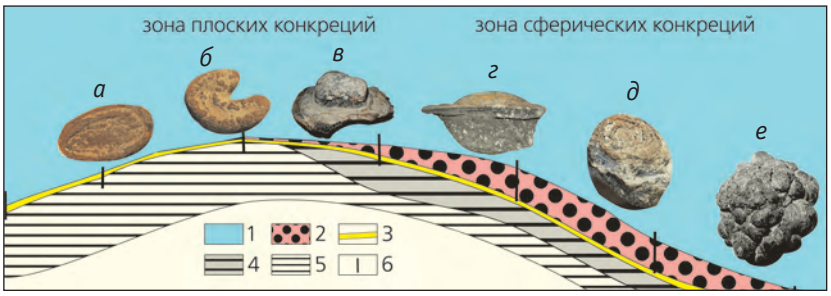



Рис.1. Схема строения конкреционного пласта в Финском заливе. Вертикальный и горизонтальный масштабы разреза отличаются в сто раз. 1 — вода, 2 — илово-конкреционный слой, 3 — песок с гравием и галькой, 4 — серая насыщенная водой глина, 5 — светло-серая, почти белая насыщенная водой глина, 6 — станции пробоотбора. Объяснение в тексте.

В коллекции морфологическое разнообразие ЖМК кажется безграничным, однако оно подчиняется универсальному закону симметрии (принципу Кюри), согласно которому симметрия среды отражается в симметрии сформированного данной средой тела, но при этом сохраняются те собственные элементы симметрии тела, которые совпадают с элементами симметрии среды. «Зная симметрию среды и собственную симметрию тела, можно всегда определить вынужденную симметрию последнего» [1, с.183]. Симметрия среды формирования ЖМК на дне Финского залива обусловлена, главным образом, гравитационным полем Земли, динамикой придонных слоев воды и рельефом дна в бассейне. Общее представление о размещении основных морфологических типов ЖМК в рассматриваемой акватории дает рис.1.

Самой высокой симметрией — симметрией шара — характеризуются конкреции (рис.1,*е*) в илово-конкреционном слое (толщиной около 30–40 см). Плавая в слое ила, они находятся в состоянии невесомости, не испытывая при своем росте действия силы тяжести и движения придонных вод. В таких условиях все элементы собственной симметрии ЖМК совпадают с элементами симметрии формирующей среды. Шаровая симметрия (по-видимому, собственная симметрия ЖМК) указывает еще и на рост конкреций в однородной питающей среде. Даже уменьшение толщины илово-конкреционного слоя ведет к потере каких-то элементов собственной симметрии ЖМК. К примеру, появляются сферы, лишенные верхнего шарового сегмента (рис.1,*д*).

В зоне полного выклинивания илово-конкреционного слоя рождаются ЖМК с вынужденной сим-

© Колокольцев В.Г., 2017

метрией, полностью навязанной формирующей средой. Упорядоченная однонаправленная ориентировка больших осей плоских эллипсоидальных ЖМК (рис.1,*а*) может быть результатом слабого, но устойчивого однонаправленного придонного течения. Для образования круглых дисков более благоприятны застойные обстановки. В поле неустойчивых течений формируются ЖМК сложных очертаний, включая широко распространенные подковообразные (рис.1,*б*) формы. При полном отсутствии илово-конкреционного слоя лежащие на дне обломки пород гравийной и галечно-валунной фракций опоясываются конкреционными кольцами (рис.1,*в*). А при наличии этого слоя такие образования почти всегда покрыты железомарганцевой коркой ниже кольца (рис.1,*г*). Примечательно, что на железомарганцевых корках нередко наблюдаются разноориентированные и в разной степени выраженные кольцевые валики (или их фрагменты). Те и другие представляют собой зародыши кольцевых конкреций, которые могут быть источником уникальной информации о ЖМК.

Еще раз подчеркнем, что кольцевые конкреции и их зародыши формируются строго по разделу грунт—вода. Отсюда следует, что если на обломке породы с железомарганцевой коркой встречаются кольца нескольких генераций, то, определив очередность их образования, можно получить представление о перемещении данного обломка в пространстве и реконструировать его «пошаговую» динамику. В нашей коллекции объектом такой реконструкции (онтогенического анализа) стал гранитный валун длиной около 8 см в форме трехосного эллипсоида с крупной ярко выраженной кольцевой конкрецией и многочисленными кольцевыми зародышами. Залегая на глубине 27 м, он

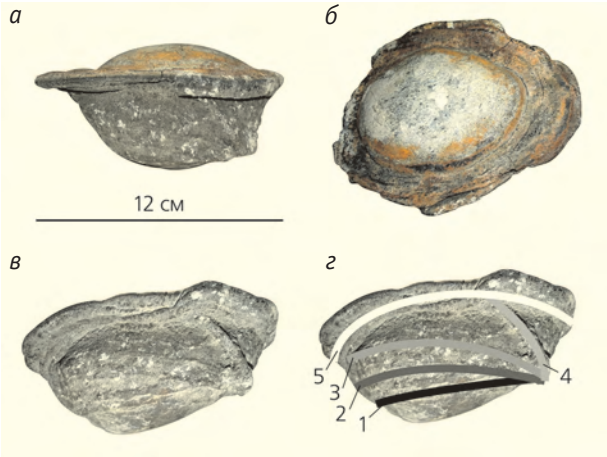



Рис.2. Кольцевая конкреция на гранитном валуне. *а* — вид сбоку; *б* — вид сверху; *в* — нижняя поверхность валуна с опоясывающими валиками; *г* — предыдущий ракурс с дешифрированными опоясывающими валиками. Цифрами показана последовательность образования валиков (эмбриональных колец).

на три четверти погружался в полужидкий темно-серый, почти черный ил. Строго по разделу ила с водой валун осложнялся крупным плоским кольцом (рис.2,*а*) толщиной 1.0–1.3 см и шириной от 2 до 4 см, над которым торчала почти чистая округлая поверхность валуна, слегка окрашенная рыжими пленками гидроксидов железа (рис.2,*б*).

Вся нижняя поверхность под кольцом была покрыта черной железомарганцевой коркой толщиной около 1–2 мм. На ней отчетливо выделялись разноориентированные утолщения в виде опоясывающих валиков высотой от 1 до 5 мм (рис.2,*в*), которые служили зародышами кольцевых конкреций, сформированных на разделе грунт—вода. В самое большое (последнее) кольцо (номер 5 на рис.2,*г*) снизу под углом 40–45° «упирался» фрагмент высокого (5 мм) валика (номер 4). Его верхняя часть полностью растворилась. Растворение этой части, находившейся выше большой кольцевой конкреции, могло произойти в процессе (или после) ее формирования, т. е. валик 4 старше (древнее) большой кольцевой конкреции. Не будет ошибкой вывести вытекающее отсюда очевидное правило: *из двух пересекающихся (как в нашем случае) или соприкасающихся колец старше то, которое в зоне их наложения обладает признаками растворения*. Это правило подтверждается другими наблюдениями, и потому попытаемся использовать его для определения очередности формирования остальных трех кольцевых валиков.

Сравнивая валики 4 и 3, замечаем отчетливые признаки растворения последнего и заключаем — он старше. Менее рельефные признаки частичного растворения валика 2 наблюдаются в месте его соприкосновения с валиком 3, откуда выводим — валик 2 старше. Слабые, но заметные следы растворения отмечаем на небольшом участке соприкосновения валика 1 с валиком 2. На этом основании заключаем — кольцо 1 старше. Таким образом, валик 1 — самый древний. Он показывает исходное положение нашего валуна, угодившего в зону конкрециеобразования.

Еще раз напомним, что каждый из валиков фиксирует былую плоскость раздела донного грунта с водой, а в целом они дают представление о прерывистом (скачкообразном) характере перемещения валуна и его пяти остановках. Последняя визуализирована крупной кольцевой конкрецией, а предыдущие — кольцевыми валиками. Короткие промежутки времени между остановками со скачкообразным изменением позиции валуна (рис.2,*г*) — это «шаги», и все они поддаются реконструкции (рис.3). На последней, самой длительной остановке происходило формирование большой кольцевой конкреции. Ее рост был прерван пробоотборником.

Приведенная реконструкция (рис.3) может служить затравкой для размышления о вероятных причинах «прыжков» валуна на глубине 27 м. Она показывает, что изначальная, зафиксированная ва-

ликом 1, позиция (рис.3, позиция 1) крайне неустойчива из-за очень высокого расположения его центра тяжести. Для выхода из равновесия с приданием валуну легкого вращательного движения и перемещения из позиции 1 в позицию 2 достаточно очень небольшой силы, эквивалентной той, которая возникает при незначительном изменении в направлении придонного течения, что в Финском заливе обычно наблюдается в весенне-осенние сезоны. Аналогичными причинами можно объяснить второй «шаг» валуна из позиции 2 в позицию 3. По мере погружения в ил (позиция 3 на рис.3) смещается к низу его центр тяжести. Это приводит к росту устойчивости валуна. Еще более устойчив он в позиции 4. Для его выхода из позиций 3 и 4, по-видимому, недостаточно силы обычных придонных течений. Такая сила могла бы возникнуть при шторме. Но, по мнению специалистов, в восточной части Финского залива даже катастрофический шторм не в состоянии проникнуть на глубину более 15 м. Иными словами, штормовые явления представляются маловероятной причиной «кувыркания» нашей конкреции на глубине 27 м. Поскольку экзогенные процессы бессильны заставить ее скачкообразно перемещаться по дну бассейна, обратимся к анализу вероятных эндогенных факторов.

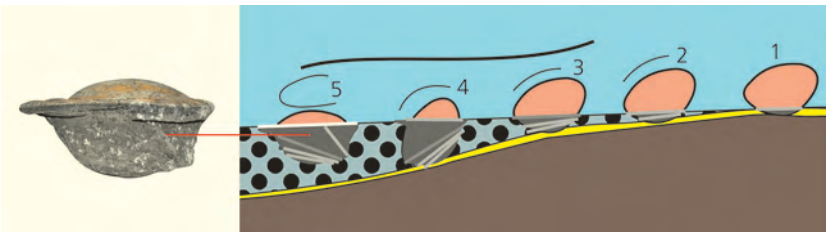



Рис.3. Прерывистое перемещение валуна в зоне марганценакопления. Цифры — этапы перемещения.

В последние десятилетия появились многочисленные публикации о существовании на дне Финского залива покмарков (пок-маков) — кратероподобных форм подводного рельефа, которые образуются в местах разгрузки восходящих газово-жидких флюидов. Диаметры кратеров большей части покмарков в восточной части Финского залива составляют 10–20 м, с характерной глубиной просадки от нескольких дециметров до 3 м [2]. В западной части Финского залива описаны более крупные покмарки диаметром свыше 150 м. Достаточно правдоподобна версия о вероятной парагенетической связи «кувыркающихся» конкреций с покмарками. Если учесть пульсационный характер разгрузки восходящих напорных флюидов, то можно объяснить и полигенерационный набор кольцевых зародышей на них.

Только эмпирическими наблюдениями можно подтвердить (или опровергнуть) версию о парагенетической связи «прыгающих конкреций» с покмарками и определить целесообразность использования предполагаемой причинно-следственной зависимости для пополнения наших знаний (о покмарках, а возможно и об источнике конкрециеобразующих элементов). Нелишне напомнить слова одного из великих, который, подчеркивая освобождающую силу науки, утверждал, что новые гипотезы и «теории важны, даже если они не более чем упражнения для нашего воображения». ■

## Литература / References

1. *Шафрановский И.И.* Симметрия в природе. Л., 1968. [*Shafranovsky I.I.* Symmetry in the nature. Leningrad, 1968. (In Russ.).]
2. *Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А. и др.* Геолого-геоморфологические условия формирования пок-маков в восточной части Финского залива. Региональная геология и металлогения. 2013; (54): 25–37. [*Zhamoyda V.A., Ryabchuk D.V., Spiridonov M.A. et al.* Geological and geomorphological conditions of formation of pockmarks in the east part of the Gulf of Finland. Regional Geology and Metallogeniy. 2013; (54): 25–37. (In Russ.).]

## Tumbling ferromanganese nodules on the bottom of the gulf of Finland

V.G.Kolokoltsev
*A.P.Karpinsky Russian Geological Research Institute (Saint Petersburg, Russia)*

Ontogenetic analysis made it possible to distinguish different varieties of ferromanganese nodules (FMN) of the Gulf of Finland. Their evolution was accompanied by multiple displacements along the gulf bottom. It is assumed that the reason for the jumps and rotational movements of the FMN were not only the bed flows and bottom unevenness, but also the processes of formation of pockmarks crater-like forms of underwater relief in the places of discharge of ascending gas-liquid fluids.

**Keywords:** ferromanganese nodules (FMN), ring nodules, symmetry universal law, ontogenetic analysis, pockmarks.

Времена и люди

# Открытия и предчувствия физика Вильгельма Вебера

кандидат физико-математических наук Б.В.Булюбаш
*Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е.Алексеева (Нижний Новгород, Россия)*

Историко-научный анализ биографии немецкого физика В.Э.Вебера (1804–1891). Рассмотрена его совместная работа с Гауссом по изучению магнитного поля Земли, в том числе его вклад в разработку приборов для измерения параметров земного магнитного поля. Эти ученые разработали абсолютную систему единиц, в которой все измеряемые величины выражались через единицы времени, массы и длины. Обсуждается историческое значение «закона силы» Вебера. В контексте рассказа об эксперименте Вебера—Кольрауша отмечен его основной результат: совпадение со скоростью света в вакууме отношения единиц электрического заряда в двух системах единиц измерения. Этот эксперимент стал первым указанием на близость теории света и теории электромагнитных явлений. И для Вебера, и для Максвелла был в равной степени актуален вопрос об электрической природе светового эфира. Вебера не следует рассматривать как безусловного сторонника принципа дальнодействия. Рассмотрена дискуссия Гельмгольца и Вебера, в ходе которой Вебер выдвинул гипотезу о существовании предельной скорости и предвосхитил основные положения электронной теории. Отмечено влияние закона силы Вебера на развитие теории гравитации в дорелятивистский период. Указано, что сторонники одного из направлений в современной теории гравитации связывают с работами Вебера (и электродинамикой дальнодействия в целом) предвосхищение некоторых положений теории прямого межчастичного взаимодействия.

**Ключевые слова:** Вебер, Гаусс, Гельмгольц, абсолютная система единиц, дальнодействие, магнитное поле Земли, электронная теория, скорость света.

Сто шестьдесят лет назад — в 1857 г. — в «Трудах Королевского саксонского научного общества» была напечатана статья В.Вебера и Р.Г.А.Кольрауша [1] с подробным описанием эксперимента, выполненного ими в 1855 г. В эксперименте измерялось отношение единиц силы тока в двух разных системах единиц измерения; было показано, что по порядку величины оно (отношение) совпадает со скоростью света в вакууме. Это обстоятельство сделало эксперимент Вебера—Кольрауша одним из ключевых событий истории физики позапрошлого столетия. Дж.К.Максвелл писал: *Единственным применением света в этих опытах было использование его для того, чтобы видеть инструменты. Значение скорости света, найденное Фуко, было получено путем определения угла, на который поворачивается вращающееся зеркало, пока отраженный им свет прошел туда и обратно вдоль измеренного пути. При этом никак не пользовались электричеством и магнетизмом* [2, с.90].

Вильгельм Вебер родился 24 октября 1804 г. в семье профессора теологии Виттенбергского университета Микаэля Вебера. Из 12 детей до зрелого возраста дожили только сестра и четыре брата. Старший брат стал министром, трое остальных братьев — университетскими профессорами.

Вильгельм Эдуард Вебер. Литография Р.Хоффмана, 1856 г. Галерея знаменитых натуралистов в Вене.

© Булюбаш Б.В., 2017

Анатом и физиолог Эрнст Генрих (Вильгельм младше его почти на 10 лет) был профессором Лейпцигского университета. В том же университете работал и младший брат Эдуард. Что же касается Вильгельма, то он всю свою жизнь (за исключением периодов 1826–1831 и 1843–1849 гг.) работал в Гёттингене.

В 1814 г. семья Веберов покидает Виттенберг в связи с утверждением отца профессором теологии Университета г.Галле. В 1822 г. в этот университет поступает Вильгельм Вебер, а уже через три года выходит в свет трактат братьев Вильгельма и Эрнста Веберов «Учение о волнах, основанное на эксперименте». В нем описывались многочисленные опыты по изучению волн на воде и звуковых волн. Характеризуя содержание трактата братьев Веберов, Ф.Розенбергер особо выделяет их приверженность волновой теории света [3, с.240–244].

В 1826 г. Вебер окончил Университет Галле, его выпускная диссертация была посвящена теории органных труб. В 1828 г. он начал работать в alma mater, сначала в должности лектора, а затем в должности ассистента профессора. Уже в первые два года работы в университете Вильгельм Вебер опубликовал четыре статьи в «Annalen der Physik und Chemie» — одном из ведущих физических журналов того времени. В сентябре 1828 г. в его жизни происходит важное событие: вместе со своим братом Эрнстом он принимает участие в седьмой конференции Общества немецких естествоиспытателей и врачей, организатором которой был выдающийся немецкий естествоиспытатель А.фон Гумбольдт. Сделанный Вебером на конференции доклад о теории органных труб был замечен и А.фон Гумбольдтом, и К.Ф.Гауссом — великим немецким математиком, профессором Гёттингенского университета и директором университетской астрономической обсерватории. Их интерес к работам молодого физика из Галле был связан с началом масштабного проекта по изучению магнитного поля Земли.

В апреле 1831 г. в Гёттингенском университете появилась вакансия профессора физики. По инициативе Гаусса эту должность предлагают Веберу, который принял предложение и 15 сентября 1931 г. приехал в Гёттинген; с этого дня началось плодотворное сотрудничество (и дружба) Вебера и Гаусса. Гаусс был достаточно компетентен как физик-экспериментатор, а Вебер как математический физик, но при этом в их творческом союзе Гаусс был в первую очередь теоретиком, а Вебер — экспериментатором.

В конце 1832 г. завершился первый этап совместной работы Вебера и Гаусса, посвященной магнитным измерениям. В том же году на заседании Королевского ученого общества в Гёттингене Гаусс рассказал о результатах работы в докладе «Интенсивность магнитной силы, приведенная к абсолютной мере». В нем ученый впервые в качестве

Александр фон Гумбольдт. Портрет кисти Г.В.Пикерсгилла, 1831 г. Коллекция картин в георгианском особняке Парк Базилдон в Беркшире (Англия).

Карл Фридрих Гаусс. Портрет кисти К.А.Йенсена, 1840 г. Архив Берлинско-Бранденбургской академии наук.

Джеймс Кларк Росс. Портрет кисти Дж.Р.Вилмана, 1834 г. Национальный морской музей в Гринвиче, Лондон.

основных единицы длины, массы и времени использовал миллиметр, миллиграмм и секунду [4]. Рассматривая эти единицы как абсолютные, Гаусс использовал их для определения немеханических величин. Единица магнетизма в такой системе определяется в соответствии с законом Кулона для взаимодействия «магнитных масс» в пустоте, а единица электричества — в соответствии с законом Кулона для взаимодействия «электрических масс». Использование рациональной системы единиц означало, что измерения интенсивности магнитного поля сводятся в конечном счете к измерению длины, времени и массы. Тем самым они становятся воспроизводимыми и сравнимыми, благодаря чему исчезает необходимость в специальной калибровке инструментов в каждом отдельном случае.

Программу измерений магнитного поля Земли координировало основанное Гауссом и Вебером гёттингенское Магнитное общество. В рамках этой масштабной программы (ее с полным основанием можно считать первым международным научным проектом) в разных районах земного шара в специально сооружаемых магнитных обсерваториях (и с помощью сконструированных Гауссом и Вебером магнитометров) проводились измерения параметров земного магнитного поля. Они позволяли вносить коррективы в разработанную Гауссом теорию земного магнетизма. В соответствии с расчетами Гаусса был, в частности, проложен маршрут арктической экспедиции Дж.К.Росса, стартовавшей в 1831 г. Одной из ее целей было определение координат северного магнитного полюса Земли. Точное местоположение полюса было установлено 1 июня 1831 г.

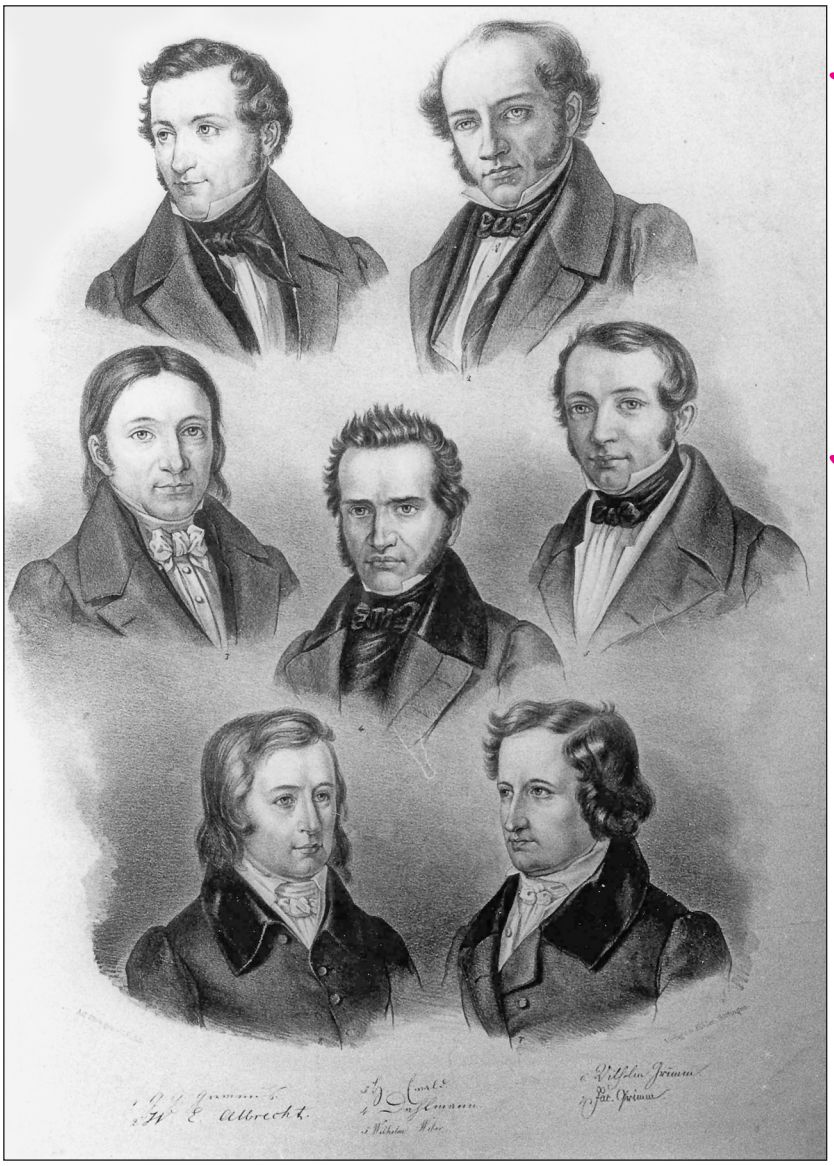
В 1834 г. только в Европе функционировало 23 магнитных обсерватории. Сопоставление поступающей из них информации позволило, в частности, установить существование магнитных бурь. В 1836–1841 гг. вышли в свет шесть выпусков сборника «Результаты наблюдений Магнитного общества»; среди прочего в них были опубликованы 15 статей Гаусса и 23 Вебера, а также (в выпуске 1840 г.) созданный ими совместно «Атлас земного магнетизма». Отметим, что в выпуске 1840 г. упомянуты магнитные обсерватории, функционировавшие в Западной Европе (Гринвич, Дублин, Лейпциг, Марбург, Берлин, Бреслау, Гейдельберг, Стокгольм), в Российской империи (Хельсингфорс, Санкт-Петербург, Москва, Киев, Казань, Барнаул, Нерчинск, Николаев, Тифлис), а также в США (Филадельфия), в Китае (Пекин) и в Канаде (Торонто). На территории Российской империи магнитные и метеорологические обсерватории были построены по инициативе Гумбольдта, посетившего Россию в 1829 г.

С Россией Вебера связывали не только данные, получаемые из магнитных обсерваторий. Так, в биографии известного российского физика немецкого происхождения Бориса Семеновича (Морица Германа) Якоби упоминается о его контактах с Вебером. В 1842 г. Якоби разработал регулятор электрического тока (реостат). Для практического использования регулятор нуждался в градуировке, в связи с чем Якоби разработал собственный эталон сопротивления — отрезок медной проволоки длиной 25 футов (7.62 м), массой 345 гран (22.4493 г) и диаметром 0.75 мм. При температуре 0°С сопротивление такого эталона составляло приблизительно 6.3 Ом. Советский историк науки А.В.Яроцкий писал: *Якоби впоследствии не без успеха пытался этот эталон распространять в Германии через В.Вебера*, замечая, что Вебер *не только сам пользуется в своей работе разработанным Якоби эталоном сопротивления, но побудил к этому еще два десятка других ученых* [5, с.168].

Гаусс и Вебер занимались не только фундаментальной наукой. В 1833 г. под их руководством в Гёттингене была построена одна из первых в мире линий электрического телеграфа. Эта линия протяженностью в 9 тыс. футов (около 2700 м) соединяла физическую лабораторию и университетскую астрономическую обсерваторию. В начале 1833 г. по телеграфу были переданы первые слова, а вскоре — целые предложения. Прекрасно сознавая перспективность электрического телеграфа как средства связи, Гаусс тем не менее не

смог убедить в этом ни правительство, ни промышленников. В итоге линия функционировала лишь до 1845 г., когда во время сильной грозы телеграф был сильно поврежден и после этого уже не восстановлен.

Успешное сотрудничество Гаусса и Вебера прервали политические события. В 1837 г., после коронации в Великобритании королевы Виктории, в Ганновере пришел к власти ее дядя Эрнст Август, одним из своих первых указов отменивший либеральную конституцию 1833 г. В ответ на это семь профессоров Гёттингенского университета опубликовали совместное письмо протеста. Одним из подписантов был Вильгельм Вебер. В «гёттингенскую семерку» входили также знаменитые филологи братья Якоб и Вильгельм Гримм. Все семеро были немедленно уволены с занимаемых ими должностей; при этом троим (и в их числе Веберу) было разрешено остаться в Гёттингене. После увольнения из университета Вебер продолжил свою работу в Магнитном обществе. Гаусс и Гумбольдт пытались убедить короля отменить указ о его увольнении. Король, однако, требовал от Вебера публичного отказа от своей подписи, что для ученого было неприемлемо.



«Гёттингенская семерка»: В. и Я.Гримм (верхний ряд), В.Э.Альбрехт, Ф.К.Дальман и Г.Г.Гервинус (средний ряд), В.Э.Вебер и Г.Г.А.Эвальд. Литография К.Рохде, 1837–1838 гг. Городской музей Гёттингена.

Вебер продолжал работать в Гёттингене до 1843 г. В том году появилась вакансия на кафедре физики Университета Лейпцига (профессорами которого, напомню, были его братья Эрнст Генрих и Эдуард). Профессором этой кафедры был близкий друг Вильгельма Вебера — Густав Фехнер. В истории физики Фехнер и Вебер известны своими идеями об атомистической природе электричества. Согласно их взглядам, электрическая материя была не непрерывной, а дискретной субстанцией и состояла из элементарных «электрических масс». Фехнер занимался не только физикой, он проводил многочисленные психофизиологические эксперименты (в ходе которых ему и Эрнсту Веберу удалось, в частности, установить первый закон экспериментальной психофизиологии — закон Вебера—Фехнера). В ходе таких экспериментов Фехнер повредил зрение, ушел в отставку и переключился на занятия философией и психологией. Освободившаяся должность профессора физики была предложена Веберу.

Именно в Лейпциге Вебер сформулировал идею закона взаимодействия «электрических масс», который, как он считал, должен заменить закон Кулона. Согласно этому закону, сила взаимодействия «электрических масс» зависит не только от расстояния между ними, но и от их относительной скорости и относительного ускорения. Первая формулировка закона Вебера появляется в 1846 г. в первом томе трудов Вебера, издававшихся под общим названием «Электродинамические мероопределения». Перед отправкой статьи в печать Вебер послал ее на отзыв Гауссу. В письме от 18 марта 1845 г. Гаусс, положительно оценивая на-

Памятник Гауссу и Веберу в Гёттингене. Монумент работы К.Ф.Харцера, 1899 г.

чатую Вебером работу, указал на необходимость *вывода дополнительной силы, которая добавляется к взаимному действию покоящихся электрических частиц, если они находятся в относительном движении, из не мгновенно, но (подобным свету образом) во времени распространяющегося действия* [6, с.627]. Отвечая Гауссу, Вебер написал: *Несомненно, объяснение, предполагающее постепенное распространение действия, было бы прекраснейшим решением загадки* [7, p.109]. Реплики Гаусса и Вебера свидетельствуют, что соотносить имя Вебера с безусловным признанием принципа дальнодействия не вполне корректно.

В 1849 г. Вебер получил возможность вернуться в Гёттинген. Там сформировался новый творческий союз — на этот раз с физиком Кольраушем. Главным итогом их сотрудничества стал упоминавшийся выше эксперимент по измерению отношения единиц тока в двух разных системах единиц.

Важное место в дальнейшей научной биографии Вебера занимает дискуссия с одним из авторов закона сохранения энергии — известным немецким физиком Г.Л.Ф.Гельмгольцем. Затронувшая весьма важные физические проблемы, дискуссия Гельмгольца и Вебера проходила в 70-х годах XIX в. Характеризуя ее в целом, Ю.А.Любимов замечает: *...В длительной научной дискуссии двух известных немецких физиков не было побежденного или победителя: спор в конце концов прекратился как-то «сам собой»* [8, с.153]. При всем том одним из ее последствий можно считать выбор названия для единицы силы тока. В 1881 г. в Париже проходил Первый всемирный электротехнический конгресс, на котором руководитель немецкой делегации Гельмгольц выступил с предложением назвать единицу силы тока «ампер» — при том, что дефакто на тот момент времени большинство физиков связывали название единицы силы тока исключительно с именем Вебера. Однако в силу авторитета Гельмгольца в научном сообществе был принят его вариант. Не исключено, впрочем, что предложение Гельмгольца назвать единицу силы тока в честь французского физика было вызвано не спором с Вебером, а с желанием авторитетного немецкого ученого внести посильный вклад в снижение напряженности между Германией и Францией после недавней Франко-прусской войны [8, с.160.]. Следует принять во внимание и пошатнувшийся к тому времени авторитет Вебера из-за его участия в сеансах американского медиума Г.Слэйда. Поклонником Слэйда и организатором сеансов был лейпцигский астрофизик и друг В.Вебера К.Ф.Цёлльнер. Историческая справедливость в признании заслуг Вебера в развитии электродинамики была восстановлена только в 1935 г., с принятием решения назвать в его честь единицу магнитного потока в системе СИ.

По поводу дискуссии Гельмгольца и Вебера Любимов также отметил, что физики, в той или иной степени принимавшие в ней участие, *не всегда были достаточно корректны по отношению друг к другу* [8, с.163]. Возможно, именно поэтому острота той дискуссии ощущалась и уже после ее формального окончания в 1881 г. Так, в 1887 г. Гёттингенское философское общество по итогам конкурса присудило вторую премию трактату М.Планка о принципе сохранения энергии. Скорее всего, это было связано с критическими замечаниями в трактате в адрес электродинамики Вебера.

Вебер ушел из жизни в возрасте 86 лет. Современники вспоминают его как скромного и дружелюбного человека, любившего ездить верхом и совершать продолжительные пешие прогулки. Он не был женат, и хозяйство в его доме вела сначала его сестра, а позднее его племянница.

Рассмотрим ниже подробно основные научные достижения Вебера.

**Закон силы.** Согласно закону Вебера, сила взаимодействия движущихся электрических зарядов определяется (в современной записи) формулой:

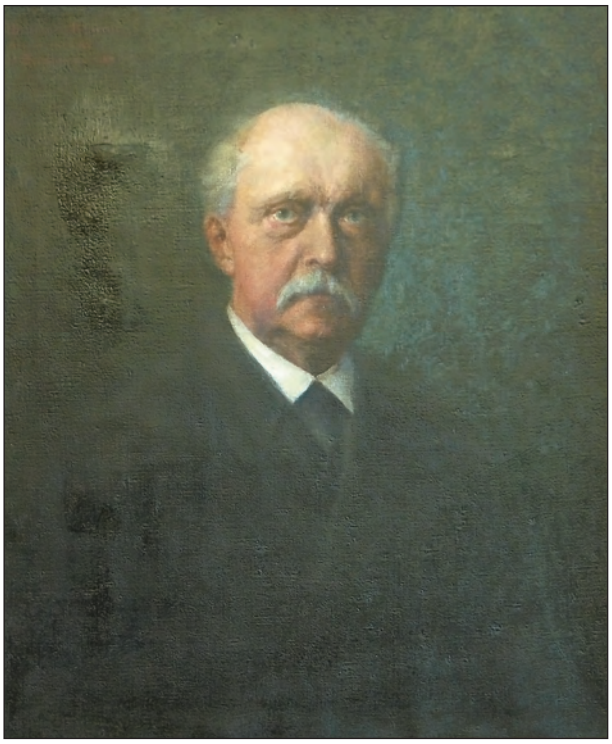
$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}\left(1 - \frac{(dr/dt)^2}{c_W^2} + \frac{2r}{c_W^2}\frac{d^2r}{dt^2}\right)$$

Здесь $q_1$ и $q_2$ — заряды, $r$ — расстояние между ними, $dr/dt$ — первая производная, $d^2r/dt^2$ — вторая производная $r$ по времени, $c_W$ — постоянная Вебера. Именно константа $c_W$ была фактически измерена в ходе эксперимента Вебера—Кольрауша, оказавшись в $\sqrt{2}$ раз больше скорости света в вакууме. Более-менее подробно процесс вывода закона Вебера проследил Любимов, отметивший, что Вебер, развивая теорию взаимодействия электрических зарядов, основывался на электродинамических работах А.М.Ампера. Исходя из представления об электрическом токе как совокупности противоположно направленных потоков положительных и отрицательных электрических масс, Вебер редуцировал полученный Ампером закон взаимодействия токов к «более элементарному» закону взаимодействия таких масс. Благодаря этому, учитывая открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции, *самому закону электромагнитной индукции дается интерпретация и обоснование на основе веберовских соотношений*, как удачно выразился Любимов [8, с.150].

По словам немецкого историка физики Ф.Розенбергера, современники Вебера реагировали на его закон как на «революционный акт первостепенной важности» — главным образом из-за того, что зависимость силы от скоростей и ускорений означала отход от классической механической картины мира, в которой образцом силы была сила тяготения, зависящая только от расстояния между взаимодействующими объектами [3, с.166]. Нетрудно видеть, что при $dr/dt$ = const третье слагаемое в скобках обращается в ноль, а при $dr/dt = c_W = c\sqrt{2}$ становится равной нулю и сила взаимодействия электрических масс в целом. Первоначально Вебер и Кольрауш, не предполагая, что константа $c_W$ столь велика, намеревались измерить ее в опытах с движущимися электрическими зарядами. Они планировали увеличивать относительную скорость зарядов до тех пор, пока они не прекратят взаимодействовать.

**Физические измерения.** С именем Вебера связано становление новой методологии физического эксперимента. Историк науки С.Р.Филонович так написал об этом: *Суть новаторства со-*

Рудольф Герман Арндт Кольрауш. Рисунок пером Ф.Юсти, 1886.



Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц. Портрет кисти Х.О.Ю.Шадова, 1891 г. Архив Берлинско-Бранденбургской академии наук.

*стояла в разработке типовых измерительных приборов, выработке единой системы измерений и процедуры обработки результатов. В целом этот подход можно было бы назвать «универсализацией измерений»* [9, с.84]. В связи с программой исследования земного магнетизма Вебер указывал: *Наше убеждение состоит в том, что традиционный способ работы в физике устарел и требует реформы, а также в том, что наш способ трактовки магнитной проблемы является первой ласточкой. Он идет против многочисленных глубоко укоренившихся привычек и заставляет многих мечтать о том. чтобы ничего подобного вовсе не возникало. Но если он будет доведен до конца, то вскоре разовьется и далее и окажет плодотворное воздействие на все области наук* [9, с.85]. В определенном смысле деятельность Вебера была связана с изменением методологии исследования, с формированием обычной для современной нам физики ориентации на количественную экспериментальную проверку гипотез. Следует учесть, что для немецкой физики начала XIX в. типичной была ориентация не на количественный, а на качественный эксперимент. Такой подход отличал, к примеру, исследования Т.И.Зеебека, открывшего термоэлектричество. Перемены же в методологии научного исследования были во многом связаны с работами Г.С.Ома, которые, кстати, Вебер оценивал очень высоко.

Тангенс-гальванометр, примерно 1910 г. Музей науки и промышленности в Чикаго.

Важным следствием осуществлявшихся под руководством Гаусса и Вебера международных геомагнитных измерений стало осознанное стремление физиков располагать типовыми приборами, позволяющими проводить измерения в разных лабораториях с одинаковой и высокой точностью. Так, историки науки установили, что приборы, использовавшиеся в геомагнитных измерениях в Бонне, Дублине, Казани, Милане, Гринвиче и других городах, были изготовлены одним и тем же мастером из Гёттингена. Уже к концу 19-го столетия в ряде стран появились крупные фирмы, специализирующиеся на выпуске научного инструментария.

В качестве примера рассмотрим конструкцию разработанного Вебером тангенс-гальванометра (тангенциального гальванометра) — одного из первых в истории физики измерителей тока. Он представлял собой круглую рамку с обмоткой из одного или нескольких витков. В центре рамки на оси круга с делениями расположена магнитная стрелка. Если по обмотке протекает ток, то в ее центре создается магнитное поле, зависимость которого от силы тока легко рассчитать. Равновесие стрелки будет при этом определяться равенством моментов сил, действующих на стрелку со стороны магнитного поля тока и магнитного поля Земли. Определяя угол поворота стрелки и зная магнитное поле Земли в данной точке, можно рассчитать магнитное поле тока и, соответственно, силу тока, протекающего по обмотке тангенс-гальванометра.

**Эксперимент Вебера—Кольрауша.** Опыт осуществлялся по следующей схеме. Лейденская банка заряжалась определенным количеством электричества и разряжалась через тангенс-гальванометр в течение определенного промежутка времени. По углу отклонения магнитной стрелки гальванометра можно было определить силу тока в так называемых «магнитных единицах». А разделив заряд банки на время, измерить ее же в «механических единицах». Проведя несколько серий измерений, Вебер и Кольрауш установили, что отношение механической единицы силы тока к магнитной равно $155\ 370 \cdot 10^6$. Это число было примерно в два раза меньше скорости света в вакууме, выраженной в миллиметрах в секунду. Таким образом, численное значение некоторой величины из области электромагнетизма оказалось одного порядка со скоростью света, относящейся к оптике — совершенно другому разделу физики. Эксперимент позволил определить константу $c_w$, оказавшуюся примерно в $\sqrt{2}$ раз больше скорости света. Через несколько лет немецкий физик Г.Р.Кирхгоф получил дифференциальные уравнения, описывающие распространение колебаний силы тока вдоль провода — так называемые телеграфные уравнения. Из них следовало, что скорость распространения волны тока вдоль провода идеальной проводимости в $\sqrt{2}$ раз

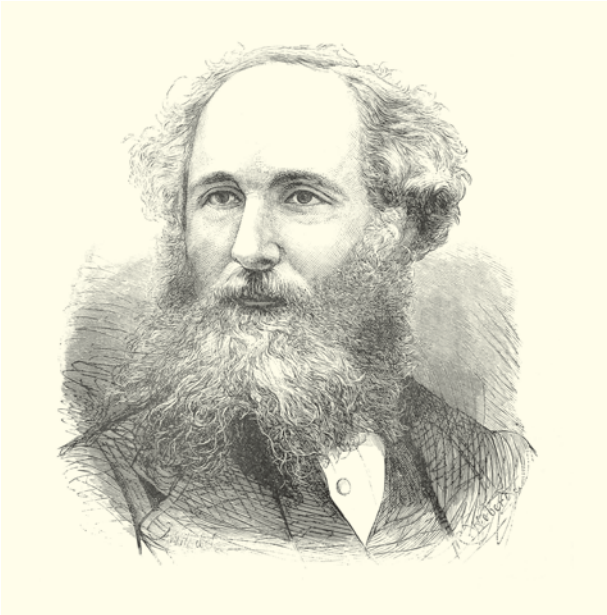
меньше константы $c_w$ и, таким образом, совпадает со скоростью света в вакууме. Одновременно и независимо от Кирхгофа тот же результат получил Вебер [10, с.411]. При этом Кирхгоф — сторонник феноменологического подхода — никак не отреагировал на это совпадение, Вебер же отмечал существенные различия между волной тока и световой волной в эфире. Как известно, связь оптики и электромагнетизма была в конечном счете установлена в электромагнитной теории света Максвелла.

Что же касается измеренного Вебером и Кольраушем отношения единиц сил тока, то, учитывая принятую Вебером модель тока, можно было сделать вывод, что отношение единиц электрического заряда в двух системах единиц численно равно скорости света в вакууме. На это обстоятельство обратил внимание Максвелл — выше было приведено его высказывание по поводу опытов Вебера—Кольрауша. Оценивая их результаты, он приходит к исключительно важному выводу: *...Совпадение результатов, по-видимому, показывает, что свет и магнетизм являются проявлением свойств одной и той же субстанции и что свет является электромагнитным возмущением, распространяющимся через посредство поля в соответствии с законами электромагнетизма* [11, с.321].

**Идея предельной скорости и представление об элементарном электрическом заряде.** В дискуссии Гельмгольца с Вебером анализировались в том числе мысленные эксперименты с движущимися «электрическими массами». Первоначально возражения Гельмгольца были связаны с зависимостью силы взаимодействия электрических зарядов в законе Вебера от их относительной скорости. По мнению Гельмгольца, такая зависимость не соответствует закону сохранения энергии. В ходе дискуссии он отказался от ограничений, накладывавшихся им на область применимости закона сохранения энергии. При этом, разбирая различные мысленные эксперименты, Вебер выдвигает несколько необычных гипотез. Так, он предполагает существование в природе предельной скорости движения материальных тел, совпадающей, возможно, с константой $c_w$. (предвосхищение релятивистских идей). Он также выдвинул гипотезу, что электрические частицы, движение которых образует электрический ток, имеют определенный и одинаковый заряд и массу (предвосхищение электронной теории). Именно в дискуссии с Гельмгольцем он ввел понятие электрического атома. Впоследствии Вебер в работе «Электродинамические мероопределения, особенно о связи основного электрического закона с гравитационным законом», описал молекулы вещества с точки зрения планетарной модели: их центральная часть заряжена отрицательно, а в постоянном вращении вокруг центра находятся положительные электрические частицы. В металлах эти частицы непрерывно переходят с одной орбиты на другую, в изоляторах же такого перехода не происходит. Вебер использовал планетарный образ молекул вещества в работах по диамагнетизму, связав это явление с возбуждением индукционных токов. Напомним, что образ молекулярного тока был впервые использован Ампером, объяснявшим с его помощью природу магнитных явлений [12].

**Закон Вебера и теория гравитации.** В последние десятилетия XIX в. к закону силы Вебера обратились специалисты по небесной механике. Как известно, одной из ее проблем было необъяснимое смещение перигелия Меркурия. Историк науки В.П.Визгин так написал об этом: *Вебер с самого начала понимал возможность распространения своего закона и на гравитацию. В 1846 г., когда об аномальном смещении перигелия Меркурия ему еще не было известно, он отмечал, что использование его закона вместо ньютоновского в небесной механике не может привести к наблюдаемым эффектам* [13, с.46]. Расчеты, сделанные на основе закона всемирного тяготения, расходились с данными астрономических наблюдений. В связи с этим некоторые астрономы предположили, что закон всемирного тяготения Ньютона должен быть модифицирован по образу и подобию закона Вебера. Завершая обзор таких попыток, Визгин пишет: *Простой перенос электродинамических законов веберовского типа на гравитацию выглядел, вообще говоря, неоправданным. Можно было говорить об аналогичности электродинамики и гравитации, но не о подлинном синтезе* [13, с.51]. Здесь нельзя не упомянуть теории итальянского физика О.Ф.Мосотти, согласно которой гравитационное взаимодействие не было первичным и сводилось к электрическим силам. Вот что об этом писал Визгин: *Мосотти не ограничился качественным рассмотрением, он разработал математически единую теорию молекулярных и гравитационных сил на основе электростатического взаимодействия* [13, с.44]. В 1876 г. уже упоминавшийся выше астрофизик из Лейпцига Цёльнер соединил теорию Мосотти с законом Вебера. В целом же попытки заменить закон всемирного тяготения на закон силы Вебера следует признать безуспешными. Проблема была разрешена только в начале 20-го столетия в рамках общей теории относительности А.Эйнштейна.

Интересно, что современные специалисты по теории гравитации Ю.С.Владимиров и И.А.Бабенко связывают с работами Вебера (и в целом с электродинамикой дальнодействия) предысторию *теории прямого межчастичного взаимодействия*. Основываясь на анализе электродинамики дальнодействия [14], они отмечают, что Вебер сделал *важный шаг от традиционного понимания взаимодействия, когда полагалось, что сила зависит только от расстояния между двумя телами* [15, с.87]. По их мнению, *в работах немецких физиков устанавливались связи с фи-*



Джеймс Клерк Максвелл. (Popular Science Monthly. 1880. V.17. Фронтиспис).

*лософскими направлениями, в которых утверждалось, что поведение отдельных элементов системы не может быть описано без учета свойств системы в целом… В дальнейшем в физике эти идеи стали называть проявлениями принципа Маха* [15, с.87]

**Световой эфир в работах Вебера.** Примером проблемы, актуальной в равной степени и для Вебера (одного из главных действующих лиц электродинамики дальнодействия), и для Максвелла (создателя теории электромагнитного поля), была проблема «устройства» светового эфира [16]. Как и Максвелл, Вебер активно обсуждал возможные модели такого эфира. Распространение света он описывал, исходя из принятого им представления об электрических корпускулах как о частицах, из которых построены эфир и «весомая материя». Главное отличие светового эфира Вебера от популярных моделей «упругого» эфира — в его электрическом происхождении. Следует сказать, что тема светового эфира появилась еще в первой статье Вебера по электродинамике (1846). Он, в частности, писал: *Силы, описываемые основным законом* [т.е. законом силы. — *Б.Б.*], *могут быть лишь частью силами, с которыми две электрические частицы непосредственно действуют друг на друга и потому могут зависеть от промежуточной среды… Далее я должен отметить недавнее открытие Фарадеем влияния электрических токов на вибрации света, из которого следует, что всепроникающая нейтральная электрическая среда образует всепроникающий эфир, передающий световые вибрации* [17, S.169]. Более того, в 1878 г. в работе «Электродинамические мероопределения, в частности об энергии взаимодействия» Вебер ссылается на Максвелла! По словам Вебера, для предлагаемой им модели эфира *действительны полученные Максвеллом законы движения динамической среды, главным образом закон распространения волн, совпадающий с законом распространения световых волн* [18, S.395].

* * *

Я уже отмечал, что обычно работы Вебера связывают с принципом дальнодействия, «по умолчанию» предполагая признание им мгновенной передачи взаимодействий. В соответствии с этим электродинамику Вебера противопоставляют теории электромагнитного поля Фарадея—Максвелла, а прогресс физики связывают с победой одной теории и поражением другой. Как мы видим, на самом деле эволюция физических идей в позапрошлом столетии была существенно более сложной. ■

## Литература / References


1. *Kohlrausch R., Weber W.* Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Zuruckfuhrung der Stromintensitats — Messungen auf mechanisches Maass. Abhandlungen der Konigl. Sachs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse. 1857; 3: 221–290. Reprinted: Wilhelm Weber's Werke. V.3. Ed. Weber H. Berlin, 1893: 609–676.
2. *Филонович С.Р.* Самая большая скорость. М., 1983. [*Filonovich S.R.* The highest velocity. Moscow, 1983. (In Russ.).]
3. *Розенбергер Ф.* История физики. Ч.3. Вып.2. М.; Л., 1936. [*Rozenberger F.* History of Physics. Pt.3. Is.2. Moscow; Leningrad, 1936. (In Russ.).]
4. *Гаусс К.Ф.* Интенсивность земной магнитной силы, приведенная к абсолютной мере. Карл Фридрих Гаусс. Избранные труды по земному магнетизму. М., 1952: 23–76. [*Gauss C.F.* The intensity of terrestrial magnetic force given to an absolute measure. Carl Friedrich Gauss. The selected works on terrestrial magnetism. Moscow, 1952: 23-76. (In Russ.).]
5. *Яроцкий А.В.* Борис Семенович Якоби. М., 1988. [*Yarotsky A.B.* Boris Semyenovich Jacobi. Moscow, 1988. (In Russ.).]
6. Brief von C.F.Gauss an W.Weber vom 1803–1845. Gauβ C.F. Werke. Bd.5. Göttingen, 1877: 627–629.
7. *Kaiser W.* Theorien der Elektrodynamik im 19 Yahrhundert. Hildesheim, 1981.
8. *Любимов Ю.А.* Электродинамическая формула В.Вебера (зарница релятивизма?). Исследования по истории физики и механики. 2000. М., 2001: 142–161. [*Lubimov Yu.A.* Electrodynamic formula of Weber. Is it a forerunner of the relativity? Historical studies in physics and mechanics. 2000. Moscow, 2001: 142–161. (In Russ.).]

9. *Филонович С.Р.* Экспериментальная физика. Физика XIX—XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах. Физика XIX века. М., 1995: 73–116. [*Filonovich S.R.* Experimental Physics. Physics of the 19–20th centuries in general scientific and sociocultural contexts. Physics of the 19th century. Moscow, 1995: 73–116. (In Russ.).]
10. *Кирхгоф Г.* Избранные труды. М., 1988. [*Kirchhoff G.* Selected works. Moscow, 1988. (In Russ.).]
11. *Максвелл Дж.К.* Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М., 1954. [*Maxwell J.K.* Selected writings on the theory of the electromagnetic field. Moscow, 1954. (In Russ.).]
12. *Булюбаш Б.В.* Проблемы электродинамики в дискуссии Гельмгольца с Вебером. Исследования по истории физики и механики. 1986. М., 1986: 210–224. [*Bulyubash B.V.* Electrodynamics problems in Helmholtz's discussion with Weber. Historical studies in physics and mechanics. 1986. Moscow, 1986: 210–224. (In Russ.).]
13. *Визгин В.П.* Релятивистская теория тяготения: истоки и формирование. М., 1981. [*Vizgin V.P.* Relativistic theory of gravitation: sources and formation. Moscow, 1981. (In Russ.).]
14. *Булюбаш Б.В.* Электродинамика дальнодействия. Физика XIX–XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах. Физика XIX века. М., 1995: 221–250. [*Bulyubash B.V.* Action at a distance electrodynamics. Physics of the 19–20th centuries in general scientific and sociocultural contexts. Physics of the 19th century. Moscow, 1995: 221–250. (In Russ.).]
15. *Владимиров Ю.С., Бабенко И.А.* Принцип Маха. Метафизика. 2016; 3: 86–99. [*Vladimirov Yu.S., Babenko I.A.* Mach's principle. Metaphysics. 2016; 3: 86–99. (In Russ.).]
16. *Булюбаш Б.В.* Максвелл и электродинамика Вебера. Максвелл и развитие физики XIX–XX веков. М., 1985: 76–83. [*Bulyubash B.V.* Maxwell and Weber's electrodynamics. Maxwell and development of physics of the 19–20th centuries. Moscow, 1985: 76–83. (In Russ.).]
17. *Weber W.* Elektrodynamische Maassbestimmungen uber ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung. Abhandlungen bei Begrundung der Konigl. Sachs. Gesellschaft der Wissenschaften am Tage der zweihundertjahrigen Geburtstagfeier Leibnizen's herausgegeben von der Furstl. Jablonowskischen Gesellschaft. Leipzig, 1846: 211–378. Reprinted: Wilhelm Weber's Werke. V.3. Ed. H.Weber. Berlin, 1893: 25–214.
18. *Weber W.* Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere uber die Energie der Wechselwirkung. Abhandlungen der Konigl. Sachs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse. V.11. Leipzig, 1878: 641–696. Reprinted: Wilhelm Weber's Werke. V.4. Ed. H.Weber. Berlin, 1894: 361–412.

## Discoveries and anticipations of the physicist Wilhelm Weber

B.V.Bulyubash
*Nizhny Novgorod Alekseev State Technical University (Nizhny Novgorod, Russia)*

The article examines the biography of the German physicist Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) from the history-of-science point of view. The joint work of Weber and Gauss on the study of the Earth's magnetic field, including Weber's contribution to the development of instruments for measuring the parameters of the earth's magnetic field, is analyzed. It is noted that Gauss and Weber developed an absolute system of units in which all measured quantities were expressed in terms of units of time, mass, and length. The historical significance of Weber's "law of force" is discussed. In the context of the story of the Weber—Kohlrausch experiment, its main result is marked: the coincidence of the ratio of electric charge units in two systems of units with the speed of light in vacuum. It is emphasized that this result was the first indication of the proximity of the theory of light and the theory of electromagnetic phenomena. It is noted that the question of the electrical nature of the light ether was important not only for Maxwell, but also for Weber. It is emphasized that Weber should not be regarded as an unconditional supporter of action at a distance principle. The Weber—Helmholtz discussion was analyzed; in its course Weber put forward hypotheses about the existence of a limiting velocity and anticipated the main provisions of the electron theory. The influence of Weber's law of force on the development of the theory of gravitation in the pre-relativistic period is noted. It is indicated that the supporters of one of the directions in the modern theory of gravitation are associated with Weber's works (and with the action-at-a-distance electrodynamics in general) as a whole) the anticipation of certain provisions of the theory of direct interparticle interaction.

**Keywords:** Weber, Gauss, Helmholtz, absolute system of units, action at a distance, Earth's magnetic field, electron theory, velocity of light.

# Мифы о происхождении человека

А.Б.Соколов[1], Е.М.Власова[2], доктор биологических наук С.А.Боринская[3], доктор исторических наук Ю.Е.Березкин[4]

[1]*Портал «Антропогенез.ру»*
[2]*Учебно-научный центр типологии и семиотики фольклора Российского государственного гуманитарного университета*
[3]*Институт общей генетики имени Н.И.Вавилова РАН*
[4]*Музей антропологии и этнографии имени Петра Великого (Кунсткамера) РАН*

Современные научные представления об антропогенезе, подкрепленные данными антропологии и генетики, однозначно доказывают, что человек произошел от обезьяноподобных предков в процессе естественного отбора. Вне научных кругов доля разделяющих подобный взгляд на происхождение человека в развитых странах колеблется от более 70% до менее 40%. Наиболее распространенной «конкурирующей гипотезой» является библейский миф о создании человека Творцом из праха. Однако в мифах народов мира содержится и множество иных версий, мало известных широкой публике. Сравнительные исследования позволяют оценить периоды возникновения и пути распространения вариантов повествований о появлении человека. В статье приведены результаты такого исследования и сделан обзор как трансконтинентально распространенных, так и локальных версий.

**Ключевые слова:** происхождение человека, мифы народов мира, фольклор.

Испокон веков люди задаются вопросом о происхождении человека. В наше, казалось бы, просвещенное время представления множества людей значительно отличаются от научных (рис.1) [1]. Доля согласных с тем, что человек произошел от существовавших ранее видов приматов, в разных странах колеблется от менее 40% (Турция и США) до более 70% (Швеция, Дания, Исландия) (рис.2) [2]. Остальные придерживаются иных взглядов либо вовсе не задумываются на эту тему.

В России, по данным Всероссийского центра изучения общественного мнения (ВЦИОМ), при разных формулировках вопроса лишь от 19% до 36% опрошенных считают, что человек и обезьяны произошли от общего предка (табл.1, 2) [3, 4]. Среди иных версий широко известна библейская, согласно которой человек был создан Творцом из праха земного, при этом даже большинство верующих россиян не отрицает, что живая природа эволюционирует, однако для человека делается исключение [4]. Иногда приходится сталкиваться с утверждениями, что человек заслан на Землю инопланетянами, происхождение и цели которых достойны триллера или комедии. Понятно, что истории о пришельцах появились лишь в XX в. — вместе с ростом популярности фантастических романов и началом освоения космоса.

© Соколов А.Б., Власова Е.М., Боринская С.А., Березкин Ю.Е., 2017

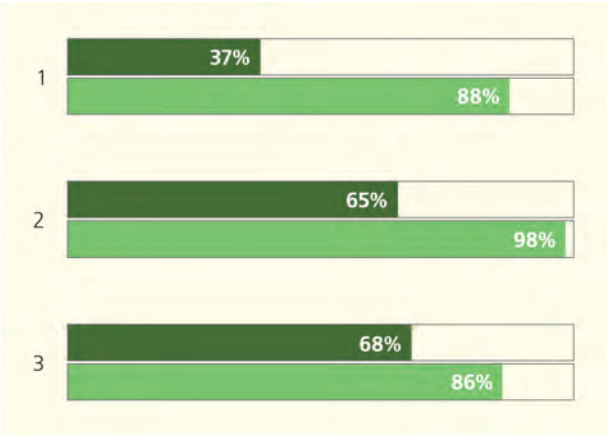



Рис.1. Научные вопросы, по которым расхождения представлений ученых (светлые столбики) и широкой публики в США максимальны [1]. 1 — продукты питания, содержащие ГМО, безопасны, 2 — человек появился в результате эволюции, 3 — вакцинация детей необходима.

Современные представления об эволюции мира живого и человека как его части тоже относительно недавнего происхождения, хотя о возможности эволюции говорили еще античные философы. Утверждение, что человек произошел от обезьяны, сформулировал в XVIII в. шотландский юрист и исследователь Д.Бёрнетт — друг поэта Р.Бёрнса и оппонент французского естествоиспытателя Ж.Бюффона. О человекообразных обезья-

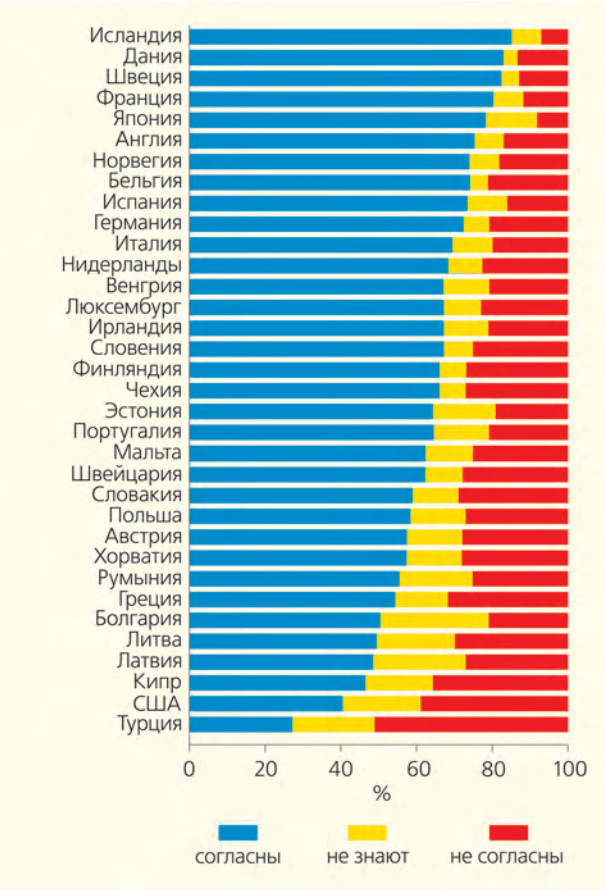



Рис.2. Отношение к утверждению «Человек эволюционировал из ранее существовавших видов» [2].

**Таблица 1**

**Представления россиян о происхождении человека (по результатам опроса ВЦИОМ в ноябре 2009 [3]).**

| С каким из высказываний вы в большей степени согласны? | |
|---|---|
| Человек и обезьяна произошли от одного предка | 36 |
| Человек был создан Богом, высшими силами | 48 |
| Затрудняюсь ответить | 16 |

**Таблица 2**

**Представления россиян о происхождении человека (по результатам опроса ВЦИОМ в 2006 и 2009 гг. [4]).**

| Какое из этих утверждений, на ваш взгляд, является наиболее верным? | 2006 | 2009 |
|---|---|---|
| Считаю, что современная наука пока не в состоянии ответить на этот вопрос | 35 | 37 |
| Человек был создан Богом, высшими силами | 24 | 23 |
| Человек произошел от обезьяны в ходе естественной эволюции | 24 | 19 |
| Меня происхождение человека мало интересует | 7 | 8 |
| Человек произошел от космических пришельцев | 5 | 3 |
| Затрудняюсь ответить | 5 | 9 |

нах, как и о жителях других континентов, в то время знали мало, поэтому кто-то считал шимпанзе дикими людьми, а кто-то представителей разных рас относил к разным биологическим видам. Ч.Дарвин в книге «Происхождение человека и половой отбор» (1871) писал об общем предке человека и обезьян и полагал, что местом возникновения человека был Африканский континент, а африканские человекообразные (шимпанзе и горилла) — это не наши предки, а своего рода двоюродные братья [5].

Если история научной мысли изучена достаточно хорошо, то время появления представлений о творении человека Богом неизвестно. Наиболее древние дошедшие до нас письменные источники на шумерском и аккадском языках, в которых описано сотворение людей из глины, относятся к Старовавилонскому периоду (XX–XVI вв. до н.э.). Один из текстов повествует о боге Энки и его матери Нинмах (она же Намму). В нем говорится, что уставшие от трудов боги решили создать людей, дабы те работали вместо них. Энки лепит людей из глины, а Нинмах определяет их судьбы. Люди дефектны, но каждому находится применение — слепой годится в певцы, кривоногий может быть ювелиром и т.п. [6]. Не исключено, что Энки добавил в глину собственную кровь, как в аккадском варианте, в котором прямо говорится о крови, смешавшейся с глиной.

Один из богов да будет повергнут,
Да очистятся боги, в кровь окунувшись,
Из его плоти, на его крови
Да намешает Нинту глины!
Воистину божье и человечье соединятся,
Смешавшись в глине!
Чтоб вечно мы слышали стуки сердца,
Да живет разум во плоти бога,
Да знает живущий знак своей жизни,
Не забывал бы, что имеет разум!

Отломила четырнадцать ломтей глины.
Семь она положила направо,
Семь она положила налево.
Кирпич — посредине между ними.
<...>
Семь мужей они сотворили,
Семь они сотворили женщин.
Праматерь, создательница судеб,
Соединила их попарно,
Участь людей начертала Мами.

Можно ручаться, что данный сюжет был известен в Месопотамии и в 3-м тысячелетии до н.э. А что в 4-м или в 5-м? Был ли он знаком обитателям Передней Азии «от Адама» или появился позже (может быть, был у кого-то заимствован)? Существовали ли представления о происхождении человека до появления мифа о творении мира божествами? Чтобы попытаться понять это, обратимся к сравнению различных мифологических традиций.

## Древнейшие истории

К настоящему времени этнографы, языковеды, фольклористы, а ранее путешественники и миссионеры записали многие сотни тысяч текстов преданий, мифов и сказок разных народов мира. Подавляющее большинство записей сделаны в XIX–XX вв. и лишь небольшая (хотя, конечно, и очень ценная) часть содержится в средневековых и древних письменных памятниках. Самые ранние шумерские и египетские тексты, передающие содержание мифов, относятся к 3-му тысячелетию до н.э., семитские — ко 2-му, греческие и китайские — к 1-му. Однако ранние письменные источники заведомо не содержат сведений обо всех фольклорных сюжетах соответствующих эпох: у авторов просто не было такой цели, да и дошли до нас лишь фрагменты древнейших текстов. Одновременно с египтянами и греками жили тысячи племен и народов, чей фольклор никто не фиксировал. Что мы знаем о фольклоре и мифологии славян VI в., когда они начали расселяться по Балканам и Восточной Европе? Практически ничего. К тому же по сравнению с историей человечества или даже со временем, прошедшим после окончания последнего оледенения, две, три или даже четыре тысячи лет — срок не столь уж большой.

Означает ли это, что фольклорно-мифологическое наследие человечества почти целиком утрачено? Не совсем, хотя конкретные тексты предков славян, кельтов или албанцев реконструировать действительно вряд ли удастся. Но можно примерно определить время распространения определенных мифологических сюжетов, а также территории, для которых они были характерны. Используя лишь сам фольклорный материал, сделать это нельзя, но если нанести области распространения тех или иных мифологических эпизодов и образов на географическую карту, а затем сопоставить эту информацию с данными генетиков и археологов о путях и времени миграции древних людей, то некоторые предположения сделать можно.

Такая работа была проведена на основе «Аналитического каталога мифологических мотивов», который включает повторяющиеся элементы фольклора (повествовательные эпизоды и образы), выделенные из более чем 50 тыс. текстов, записанных на разных языках у народов Старого и Нового Света. Хотя каталог не включает все опубликованные и хранящиеся в архивах записи (как уже было сказано, их сотни тысяч, если не миллионы), он содержит достаточно представительную выборку данных и — что крайне важно — примерно в одинаковой степени отражает фольклорные традиции всех континентов.

Если тот или иной мифологический сюжет был записан в местах, которые лежат на пути известных миграций, и в других регионах не встречается или встречается единично, то логично предположить, что распространялся он именно в ходе этих миграций. Ключевыми пунктами датировки распространения фольклорных эпизодов и образов являются время выхода современного человека из Африки и заселение Нового Света. По данным археологов и генетиков, из Африки в Евразию наши предки проникли 70–50 тыс. лет назад. Заселение Америки началось 17–15 тыс. лет назад и длилось примерно три тысячелетия. Позже отдельные группы людей из Сибири проникали лишь на Аляску и в Американскую Арктику. Первые группы мигрантов в Америку продвигались, скорее всего, вдоль берега океана, а когда канадские и аляскинские ледники стали таять, в Новый Свет прошли также те, кто жил в континентальной Сибири. Датировки в 15 или 50 тыс. лет назад приблизительны, они еще будут уточняться, но последовательность процессов и их эпохальная принадлежность установлены достаточно надежно.

Область распространения нескольких мифологических сюжетов совпадает с путями расселения людей с африканской прародины вдоль побережья Азии и затем Америки. Большинство этих сюжетов описывают происхождение смерти и объясняют, почему люди утратили способность жить вечно или почему не люди, а змеи (или ящерицы, пауки и т.п.) стали бессмертными [7]. К наиболее распространенным историям о происхождении смерти относится сюжет смены кожи (согласно одному его варианту, раньше люди, подобно змеям, меняли кожу и омолаживались; согласно другому, способность к смене кожи должна была достаться людям, но по разным причинам досталась другим существам). Широко распространено и противопоставление смертных людей бессмертному, вечно возрождающемуся месяцу. Есть и другие сюжеты — более редкие, но распространенные на тех же территориях, т.е. в Африке, Юго-Восточной и отчасти Южной и Восточной Азии, Австралии, Меланезии, Америке. Так, в сответствии с одним из них, персонаж бросал в воду щепки и говорил, что как щепки всплывают в воде, так и люди будут возрождаться после смерти. Однако другой персонаж бросил камень, и, поскольку тот утонул, люди сделались смертными. К этой же совокупности древнейших мотивов относится отождествление радуги со змеей и, возможно, тема происхождения огня. Во всяком случае только в Африке и в индо-тихоокеанском мире распространены представления, будто до того как люди получили огонь, они готовили пищу на солнцепеке или согревали ее под мышками. В этих же регионах нередко считается, что первоначальной обладательницей огня была некая женщина. В континентальной Евразии такие представления не зафиксированы. Здесь женщина, но также нередко и мужчина — это дух огня, сам огонь.

То, что первой темой, привлекшей внимание наших предков, была смертность людей, совершенно логично — разве есть что-то загадочнее и важнее? Освоение огня было древнейшим и важ-

нейшим шагом в развитии технологии, поэтому и здесь все закономерно.

Подчеркнем еще раз: о возрасте соответствующих мифов свидетельствует их наличие на территориях, контакты между которыми имели место лишь в отдаленном прошлом, а затем надолго прервались. Мифы о смертности человека не просто проникли в Новый Свет, но зафиксированы в основном в Южной Америке, где лучше, чем в Северной, сохранилось культурное наследие самых ранних мигрантов. Что же касается параллелей между Африкой и индо-тихоокеанской окраиной Азии и Австралией, то они доказывают появление подобных мифов ранее 50 тыс. лет назад. Судя по данным генетики, поток первых африканских мигрантов направился прежде всего вдоль южных берегов Азии и далее в Австралию. Люди, которые заселили континентальную Евразию, тоже вышли из Африки, но их культура должна была подвергнуться гораздо большим изменениям, нежели культура тех, кто направился на восток вдоль побережья Индийского океана, ведь «северные евразийцы» из тропиков попали в холодные леса и тундростепи. К тому же значительная часть этих ранних переселенцев вымерла в эпоху ледникового максимума (24–18 тыс. лет назад). В итоге от африканских культурных корней в континентальной Евразии мало что осталось, а в индо-тихоокеанской Азии древнейшее африканское наследие сохранилось относительно хорошо.

## В мифах и фольклоре народов мира

Сюжет сотворения человека божеством в Африке южнее Сахары отсутствует, что позволяет предположить, что он появился позже 50 тыс. лет назад. Точнее сказать, в Африке, а также в Меланезии и Австралии подобные повествования хотя изредка и встречаются, однако мало похожи друг на друга, так что на их происхождение из одного центра ничто не указывает. Зато в тех же самых регионах, где распространены мифы о смертной природе человека, практически повсеместно зафиксированы истории о том, что люди не были сотворены божеством, а вышли из-под земли — одни или вместе с животными. Здесь же рассказывают, будто люди спустились с неба (рис.3). Можно предположить, что эти сюжеты уже существовали до выхода человека из Африки, а следовательно, их возраст — более 50 тыс. лет. Одного ли они возраста с мифами о происхождении смерти или появились раньше или позже их — об этом судить невозможно. В принципе допустимо, что какие-то мифы появились в Африке раньше 50 тыс. лет назад, но ни доказать, ни опровергнуть это предположение мы не в состоянии.

Вариант с выходом людей из-под земли более показателен, чем тот, что описывает спуск людей с неба. Согласно ему, людей было много, среди них находились мужчины и женщины, дети и взрослые. Это совсем иная концепция, нежели в большинстве мифов о творении человека божеством. Что касается спуска людей с неба на землю, то там есть разные версии — как со многими людьми разного пола и возраста, так и с парой первопредков, от которых затем произошло человечество. Этот последний вариант (с парой первопредков) изредка встречается и в континентальной Евразии (например, у ханты). Однако в целом как «спуск с неба», так и «выход из-под земли» приурочены к тем территориям, на которых зафиксированы и другие сюжеты, вероятно, возникшие еще у наших африканских предков.

Весьма древним может быть и представление о происхождении людей от растений или история о том, что люди выросли как трава. Однако конкретные варианты этих повествований сильно различаются, так что независимое возникновение подобных повествований в разных регионах вполне вероятно.

Следующая группа мифов о происхождении человека представлена в индо-тихоокеанских районах Азии и в Америке, но отсутствует в Африке и на большей части континентальной Евразии. Чтобы попасть в Новый Свет, эти сюжеты должны были быть известны в Восточной Азии как минимум 15 тыс. лет назад, тогда как отсутствие африканских аналогий указывает, что 50 тыс. лет назад подобные повествования еще не возникли. Возраст в 15, максимум 20, в крайнем случае 30 тыс. лет вероятнее, чем в 30–50 тыс. лет, поскольку людей современного типа ранее 30 тыс. лет назад в Восточной Азии, по-видимому, еще не было. Следуя вдоль берега океана, они очень давно про-

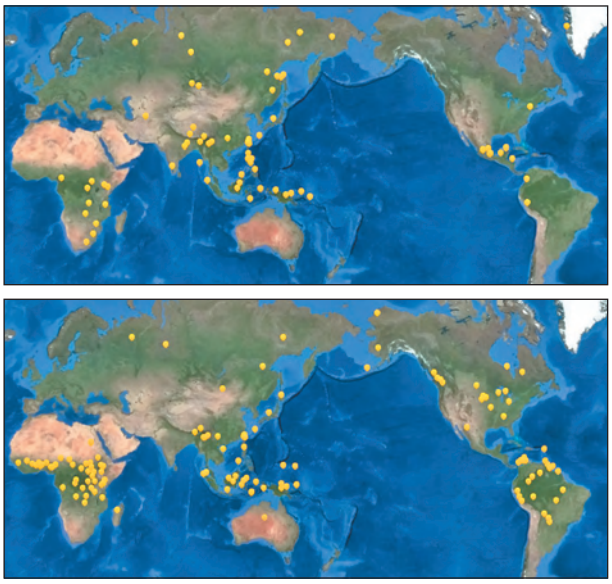


Рис.3. Мотивы о происхождении человека, предположительно существовавшие более 50 тыс. лет назад. Вверху «Люди вышли из-под земли», внизу — «Люди спустились с неба».

никли в Австралию, но в фольклоре австралийских аборигенов аналогий подобным рассказам как раз не обнаружено.

К группе мифов, которые, вероятно, впервые распространились в пределах индо-тихоокеанской окраины Азии, относятся представления о происхождении людей из капель крови. На о-вах Адмиралтейства рассказывают, что люди возникли из капель крови богини, порезавшей себе палец раковиной, у нанайцев божество укусило себе палец, у ючи на юго-востоке США первые люди возникают из менструальной крови Солнца, а яномами в южной части Венесуэлы считают, что некий герой подстрелил Месяц и из его крови родились прародители племени. К той же группе относятся сюжеты о происхождении людей из зерен, о сотворении их из кожных чешуек или грязи, собранной со своей груди не мывшимся долгое время богом. В этот же период в Восточной Азии распространились истории о том, что люди вообще или отдельные родовые группы и племена — потомки собаки (рис.4). Характерно, что в Южной Америке все эти сюжеты либо вовсе отсутствуют, либо встречаются лишь в относительно близких к Панамскому перешейку районах, но на Огненной Земле и на востоке Бразилии их нет. В основном они характерны для западных и северных районов Северной Америки. Подобное распределение свидетельствует в пользу того, что в мифологии самых первых мигрантов в Новый Свет соответствующие сюжеты отсутствовали. В то же время в Старом Свете они характерны не для Сибири, а для Юго-Восточной Азии, а в Америку проникли, вероятно, с теми переселенцами, которые шли вдоль берега океана.

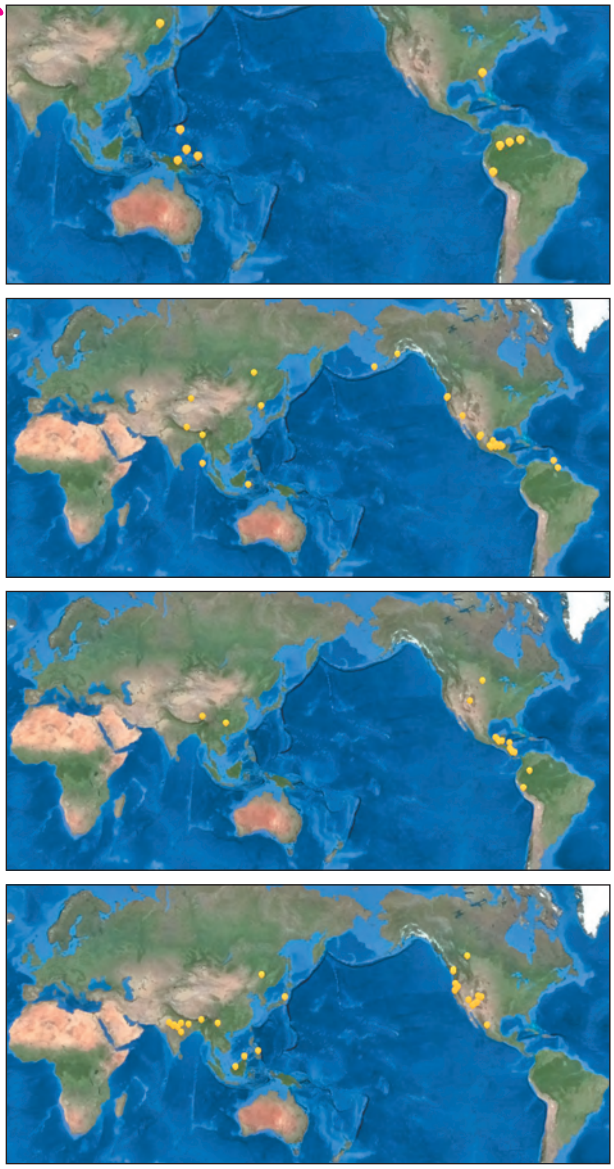


Рис.4. Мотивы, распространение которых датируется 15–30 тыс. лет назад. Сверху вниз: «Люди из капель крови», «Люди — потомки собаки», «Люди из зерен», «Люди созданы из сошедших с кожи персонажа чешуек или грязи».

К данной группе могут также принадлежать истории о том, что первые люди были созданы из непрочного, неподходящего материала (масла, воска, снега или теста) и поэтому оказались неполноценны. Лишь со второй, третьей, а то и четвертой попытки божествам удается создать настоящих людей. Подобный мотив в мифах творения встречается, однако, редко. Он гораздо характернее для повествований, в которых говорится не о людях вообще, а о конкретном персонаже (типа Снегурочки).

Наиболее поздними могут быть сюжеты, имеющие региональное распространение: такие как происхождение людей от свиньи или истории о том, что упавшие с дерева плоды или листья кокоса превратились в женщин. Оба сюжета встречаются в весьма ограниченных ареалах в Азии и Океании (рис.5). Логично, что легенда о происхождении женщин из кокоса встречается в Юго-Восточной Азии и Меланезии, т.е. как раз там, откуда родом кокосовая пальма [8].

Большего внимания заслуживает следующий характерный для Юго-Восточной Азии с прилегающими областями Индии и Южного Китая миф: женщина рожает тыкву, мешок с яйцами, кусок мяса и т.п.; рожденное разрезают, рубят, и кусочки превращаются в людей; из тыквы или мешка тоже выходят многочисленные люди — обычно предки отдельных племен. Как правило, этот сюжет составляет часть длинного мифологического повествования, которое начинается с рассказа о том, каким образом брату с сестрой удалось спастись от потопа и как они решились нарушить запрет и вступить в брак. Наряду с индийско-сибирско-североамериканским сюжетом добывания земли со дна океана (за чем нередко следует появление людей) миф о потопе и о «рождении людей из кусочков» — наиболее сложный и разработанный во всей мировой мифологии. Поскольку ни в Америке, ни даже в Северном Китае или Индонезии он не

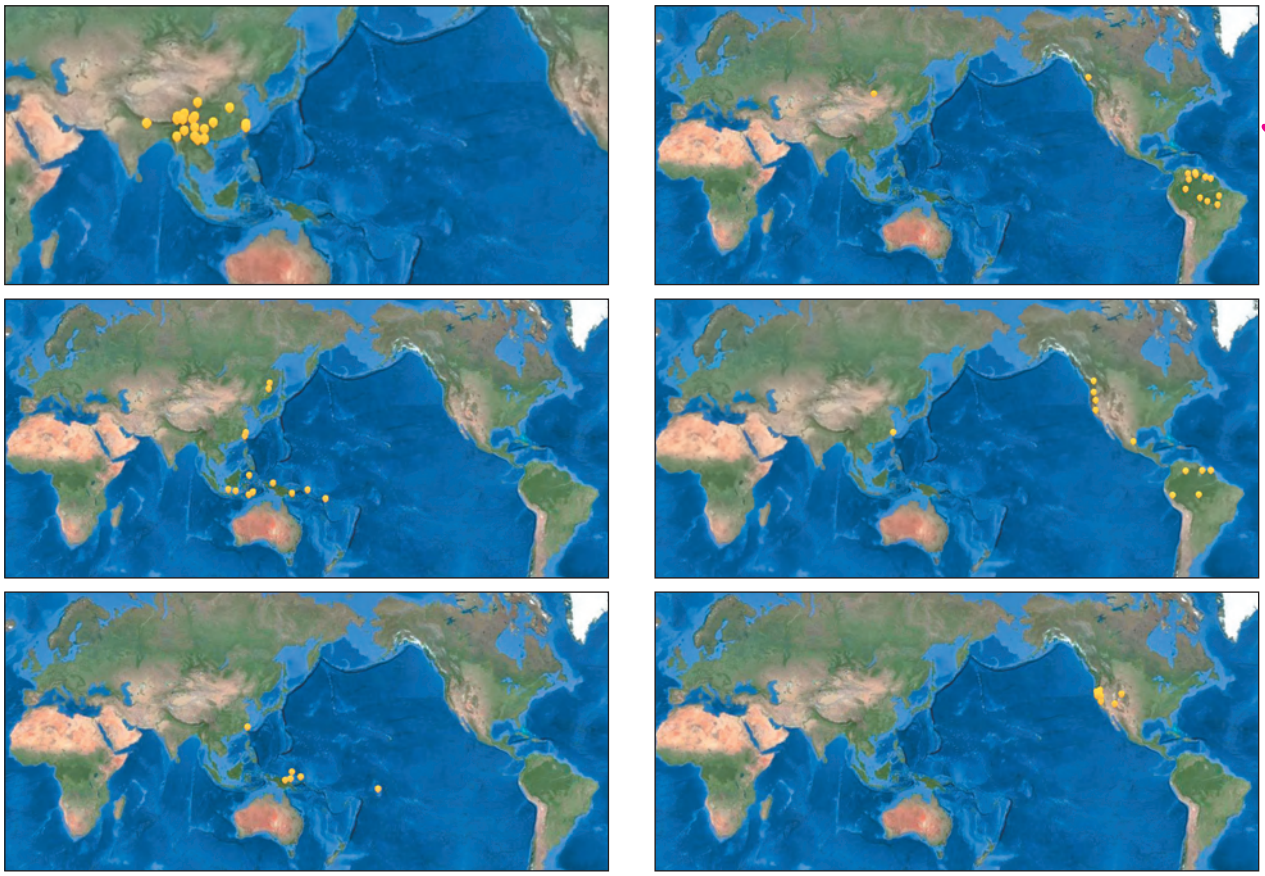


Рис.5. Сюжеты с региональным распространением. Слева — азиатские сюжеты, сверху вниз: «Люди из кусочков», «Люди — потомки свиньи», «Женщины из кокосов». Справа — сюжеты с преимущественным распространением в Новом Свете, сверху вниз: «Выловленные рыбы превращаются в первых людей или в женщин», «Новые люди из костей прежних», «Люди были сделаны из палочек, тростинок или стрел».

известен, данный цикл в целом вряд ли сформировался в палеолите. Вместе с тем в его основе лежит более общая тема: порождение нынешних людей братом и сестрой, обычно спасшимися после катастрофы, которая уничтожила древнее человечество. Этот мотив в Америке есть, а его распределение в Старом Свете однозначно указывает на его первоначальное появление в пределах индо-тихоокеанской окраины Азии; соответственно, его возраст вполне может быть более 15 тыс. лет. Что касается мотива появления первых людей из тыквы, то, судя по изображениям древних майя и некоторых их соседей, он был известен в Мезоамерике, хотя в текстах, записанных после прихода испанцев, данный сюжет не зафиксирован. Вряд ли отраженный на этих мезоамериканских изображениях миф исторически связан с вариантами из Юго-Восточной Азии, скорее это случайное совпадение.

Часть сюжетов встречается только или преимущественно у американских индейцев, причем не повсеместно, а лишь в отдельных регионах: люди возникли из палочек или из костей прежних людей либо были выловлены, как рыбы (рис.5). Что касается Старого Света, то на огромных пространствах от Балтики до Тихого океана в недавнее время (вряд ли ранее середины 1-го тысячелетия) распространился миф о том, как Бог сделал людей, оставил собаку сторожем, а сам пошел принести людям души. В это время противник Бога подкупил собаку, дав ей теплую шкуру, и испортил человеческие заготовки — оплевал их или оживил сам, лишив тем самым бессмертия. Происхождение этого сюжета сложное и запутанное и отражает трансконтинентальные связи последних тысячелетий. Похоже, что сюжет сформировался у индоевропейцев, живших в эпоху бронзы в евразийских степях. В этом исходном варианте противником Бога являлась лошадь, пытавшаяся растоптать человеческие фигуры, а собака доблестно их защитила. В подобном виде сюжет сохранился в Индии, Пакистане, Таджикистане, Абхазии, Грузии (у сванов), Армении. Его отголоски отмечены у западных монголов, киргизов и даже на далеком севере у нганасан. После радикальной культурной и языковой трансформации второй половины 1го тысячелетия, когда зороастризм (там, где он был) уступил место исламу, а иранские языки были в значительной мере вытеснены тюркскими, сюжет оказался

«вывернут наизнанку»: место «дьявольской лошади» заняла ранее почитаемая собака. За «предательство» Бог заставил ее быть слугой человека и терпеть невзгоды. В индийских и кавказских вариантах подобному наказанию подвергается лошадь, а собака получает награду.

Был ли миф о лошади, собаке и сотворении человека знаком большинству индоевропейцев, а не только обитателям степной зоны (вероятно, индо-иранцам)? В датском, норвежском или литовском фольклоре кое-какие параллели имеются, но касаются они в основном лишь представления о лошади как о творении черта. Дохристианская мифология населения Испании, Франции, Италии известна очень плохо (латинские источники в основном следуют греческим образцам). Так что какой-то сюжет, характерный именно для древней Европы, тем более для периода ранее неолита, реконструировать трудно.

Вернемся к библейскому мифу о творении человека. Вполне вероятно, что он принадлежит к общемесопотамской традиции, к которой относятся также шумеро-аккадские варианты. Однако о более отдаленном родстве судить невозможно — детальные совпадения практически не встречаются, а общий мотив создания из глины (в сущности — из земли) слишком прост. На значительной части Евразии и Африки возможные древние местные варианты перекрыты и ассимилированы христианской и исламской традицией. Можно лишь с высокой вероятностью утверждать, что тема творения первого человека (а не появления людей, вышедших на землю из некоего вместилища или рожденных божественной парой) не относится к числу тех, которые с самого начала привлекали внимание наших предков. Нельзя исключать, что такого рода повествования здесь и там появлялись в разное время, но в популярный, широко распространенный сюжет они долго не превращались. В западной половине ойкумены ситуация стала меняться в последние тысячелетия, когда здесь распространилось христианство (и другие авраамические религии). Не исключено, что степной индоевропейский (как мы полагаем) миф о лошади, собаке и творении человека (именно человека, может быть, пары людей, но не о появлении сразу множества людей) с переднеазиатскими версиями каким-то образом связан, однако доказать это трудно. В восточной половине ойкумены создание человека божеством из земли (глины) встречается лишь как один из множества вариантов мифов о появлении людей. При этом чаще всего сам по себе акт творения маловажен, внимание сосредоточено на другом — противопоставлении двух творцов, чьи творения различаются, или опять-таки на том, почему созданные люди не живут вечно.

В целом обзор мифов и преданий в глобальном масштабе показывает, что разнообразие представлений о происхождении людей чрезвычайно велико. Помимо перечисленных версий есть еще множество локальных вариантов. В предки людям записывали карликов и гигантов, различные растения и животных — не только рыб, собак и свиней, но и муравьев, лягушек, червей, птиц. В пантеоне предков нашлось место и для обезьян. Миф макуа (Мозамбик) сообщает, что создатель Мулуку сотворил мужчину и женщину и пытался учить их основам культуры, но они не захотели учиться и убежали в лес. Тогда раздосадованный творец обучил двух обезьян, которые оказались очень толковыми. Отрезав им хвосты, Мулуку превратил обезьян в людей, а хвосты приделал нерадивым людям, обратив их в обезьян. Так что люди — это потомки сообразительных обезьян, а обезьяны произошли от нерадивых людей.

Широкое распространение некоторых сюжетов о происхождении человека связано с включением их в состав мировых религий. При этом возникали новые версии, в которых местные и заимствованные мотивы образовывали причудливые комбинации. Например, в Сибири у хакасов, ханты, манси, якутов, эвенков библейская история об изгнании Адама и Евы из рая в наказание за съеденный плод, который Бог им есть запретил, получила собственную интерпретацию. Первые люди, которых и людьми-то в полном смысле слова назвать было нельзя, поели голубики, брусники или иных лесных ягод. После этого с их тел сошли шерсть или роговое покрытие и они породили многочисленное потомство. Кстати, вовсе не очевидно, что мотив запретного плода был заимствован сибирскими аборигенами от русских, он мог гораздо раньше проникнуть сюда с Ближнего Востока через Среднюю Азию.

В сказочном фольклоре, сюжеты которого широко распространились по Евразии и Северной Африке за последние полторы тысячи лет, порой встречаются те же мотивы, что и в мифах о происхождении человека. Насколько случайны подобные совпадения, сказать чаще всего нельзя. Перестав быть частью мифологической традиции, сказочные мотивы легко заимствовались и распространялись на огромные расстояния. Определить в этом случае их первоначальный ареал сложно. Вот, к примеру, сказка об умном мужике Гавриле, записанная 100 лет назад этнографом В.Н.Добровольским в Смоленской губернии. Формально она соответствует сюжету о появлении людей из непрочных материалов, однако эта история в данном случае воспринимается как заведомая выдумка, да и соответствующий миф вряд ли когда-либо был известен в Европе. Сказывают, что Гаврила хотел слепить глиняного человека, чтобы тот командовал мужиками. Но глиняный человек погиб под дождем. Второй вариант — из ржаного теста — сожрала свинья. Свинью стали бить дубовой палкой и лозой — так получились паны Дубинский и Лозинский.

Некоторые мифологические сюжеты сейчас переживают второе рождение в массовой культу-

ре, когда в мифах разных народов пытаются найти отражение реальных событий, имевших место в глубокой древности. Сюда можно отнести попытки креационистов подвести научную базу под библейское предание о сотворении мира. Или, например, люди, спускающиеся на Землю с неба, — чем не наивная интерпретация «палеоконтакта», идеи об инопланетном происхождении человека. Однако возникает вопрос: почему миф о спустившихся с неба предках отражает реальность в большей степени, чем легенды о людях, вылезающих из-под земли, из трещины в скале или из нароста на дереве? Псевдонаучные фильмы о древних гигантах — предках современных людей — демонстрировались даже по федеральным каналам российского телевидения. Здесь народные сказания о великанах переплелись с учениями мистиков XIX в. и легли в основу безграмотных, но привлекательных для публики нелепых гипотез.

Традиционный фольклор, в том числе мифы, — это ключ прошлому. Таких ключей несколько, одними распоряжаются археологи, другими — генетики, третьими — лингвисты и т.д. Сопоставление результатов, полученных этими науками, их синтез, позволяет выявить не только пути древних миграций и контакты между разными культурами, оставившими материальные следы, но и представления людей далекого прошлого об окружающем их мире, то, что их волновало, и то, что они рассказывали своим детям. Фольклор остается уникальным источником данных для реконструкции элементов духовной культуры древних обществ, и на этом пути еще многое предстоит исследовать.■

**Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-18-03384).**

## Литература / References


1. *Funk C., Rainie L.* Public and Scientists' Views on Science and Society. The Pew Research Center (29.01.2015). Available at: http://www.pewinternet.org/2015/01/29/public-and-scientists-views-on-science-and-society.
2. *Miller J.D., Scott E.C., Okamoto Sh.* Public acceptance of evolution. Science. 2006; 313(765): 765–766. Doi:10.1126/science.1126746.
3. Дарвинисты среди нас, или Кто создал человека и был ли Всемирный потоп? ВЦИОМ. М., 2009. Пресс-выпуск №1372. [Darwinists among us, or who created man and whether there was a worldwide deluge? Russian Public Opinion Research Center (VCIOM). Moscow, 2009. Press release №1372 (In Russ.).] Available at: http://wciom.ru/index.php?id=236&uid=12813.
4. ВЦИОМ. М., 2009. Пресс-выпуск №1175. [Russian Public Opinion Research Center (VCIOM). Moscow, 2009. Press release №1175. (In Russ.).] Available at: http://wciom.ru/index.php?id=236&uid=11557.
5. *Медников Б.М.* Дарвинизм в XX веке. М., 1975. [*Mednikov B.M.* Darwinism in the 20th century. Moscow, 1975. (In Russ.).]
6. *Афанасьева В.К.* Гильгамеш и Энкиду: Эпические образы в искусстве. М., 1979. [*Afanasieva V.K.* Gilgamesh and Engidu: Epic characters in art. Moscow, 1979. (In Russ.).]
7. *Березкин Ю.Е., Боринская С.А.* О чем говорили наши далекие предки. Природа. 2014; 12: 48–54. [*Berezkin Yu.E., Borinskaya S.A.* What our distant ancestors were talking about? Priroda. 2014; 12: 48–54. (In Russ.).]
8. *Ward G., Brookfield M.* The dispersal of the coconut: did it float or was it carried to Panama? J. Biogeogr. 1992; 19: 467–480.


## Myths about the descent of man

A.B.Sokolov[1], E.M.Vlasova[2], S.A.Borinskaya[3], Yu.E.Berezkin[4]
[1]*antropogenez.ru*
[2]*Centre for Typological and Semiotic Folklore Studies of Russian State University for the Humanities*
[3]*Vavilov Institute of General Genetics, RAS*
[4]*Peter the Great Museum of Anthropology and Ethnography (Kunstkamera), RAS*

The scientists who study the origin of man using the data of genetics and physical anthropology possess an overwhelming amount of facts that prove the development of *Homo sapience* from more primitive primates in process of natural selection. Beyond the academic community, from more than 70% to less than 40% of the population of developed countries share such a view. The Biblical myth about the creation of the first man from dust or mud is the most widespread «alternative hypothesis». Myths recorded in different parts of the Globe contain also other versions which usually are not known to the public. The comparative analysis of mythological traditions related to the origin of man opens possibility to assess the time when particular versions emerged as well as the routes of their further spread. In our paper we present results of the study and shortly describe the versions of myths, recorded both across continents and locally.

**Keywords:** descent of man, myths, folklore.

# Об Алексее Андреевиче Ярошевском

3 сентября 2017 г. ушел из жизни Алексей Андреевич Ярошевский, доктор геолого-минералогических наук, профессор Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, ведущий геохимик нашей страны и мира.

Алексей Андреевич обладал фундаментальными знаниями и широкой эрудицией по многим направлениям естественных наук. Он был членом редколлегии журнала «Природа» с 1991 г., долгое время возглавляя отдел наук о Земле.

Свою научную деятельность Алексей Андреевич начал еще будучи студентом геологического факультета МГУ. Его доклад на научной конференции о зависимости формы кристаллов гранатов от химического состава среды минералообразования был опубликован в Трудах Минералогического музея АН СССР. Публикацию заметили. Она вызвала и положительную, и критическую реакцию.

В 1957 г. Ярошевский окончил кафедру геохимии геологического факультета и был приглашен академиком А.П.Виноградовым в аспирантуру Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского (ГЕОХИ) АН СССР. В 1966 г. он защитил кандидатскую диссертацию. В ней Алексей Андреевич впервые в геологии представил физико-химическую модель некоего геологического процесса. Ему пришлось задуматься, как необходимо сформулировать (геологическую!) проблему, чтобы методом теоретического и экспериментального моделирования получить решение, имеющее геологический смысл. В дальнейшем под его руководством была создана первая в мире физико-химическая модель динамики магматических процессов.

Другое направление работ Ярошевского связано с участием в создании модели химического строения земной коры. Основой этих исследований стали классические работы академика А.Б.Ронова по разработке количественной модели строения осадочной оболочки Земли и гранитно-метаморфической оболочки континентов. В задачу Алексея Андреевича входило обобщение данных о химических составах главнейших типов пород земной коры. Полученные в этих работах результаты приняты в современной геологии и используются в российских и международных справочниках и многочисленных публикациях.

Создание модели химического строения земной коры позволило Ярошевскому обратиться к разработке количественной модели динамики геохимического цикла. Эти материалы и идеи были опубликованы в серии статей и защищены в качестве докторской диссертации в 1986 г.

В 1971 г. Ярошевский начинает читать курс «Геохимия» для студентов геохимического отделения геологического факультета МГУ, переданный ему Виноградовым. Эта работа заставила Алексея Андреевича вникнуть в широкий круг проблем геохимии, что привело к разработке целого ряда спецкурсов.

Алексей Андреевич Ярошевский (6.09.1934 — 3.09.2017)

Работа Ярошевского как одного из ведущих геохимиков страны и блестящего лектора заслужили ему авторитет в мировом геохимическом сообществе. Алексей Андреевич воспитал 38 поколений выпускников кафедры геохимии, под его руководством и при его поддержке защищены кандидатские и докторские диссертации, многочисленные курсовые и дипломные работы. Он был членом экспертного совета ВАК по наукам о Земле, членом экспертного совета по наукам о Земле Российского фонда фундаментальных исследований, членом ученых советов ГЕОХИ и геологического факультета МГУ, членом редколлегий нескольких академических журналов. Ярошевский выступал с лекциями во многих российских и зарубежных университетах. Ему присвоено звание заслуженного деятеля науки Российской Федерации.

Главным устремлением Ярошевского в научной деятельности было желание перевести геохимию на язык физической химии и тем самым создать основы теоретической геологии. Это направление в науках о Земле стало центральным во второй половине XX в. и в XXI в. Вклад Ярошевского в его развитие, несомненно, значителен.

Алексей Андреевич Ярошевский создал научную школу, воспитав много учеников, которые продолжают его дело. Он прожил долгую и насыщенную жизнь, целиком реализовал себя в искренне любимой им отрасли науки. Это был великодушный человек, обладающий энциклопедическими знаниями. Настоящий естествоиспытатель. Мы глубоко сожалеем о его уходе и счастливы, что он долгое время был с нами.

## Авиация. Космонавтика

**В.Т.Грумондз.** ИСТОРИЯ ПОЛЕТОВ. М.: Наука, 2017. 168 с. (Серия Академкласс).

Научно-популярная книга Валерия Тихоновича Грумондза — доктора физико-математических наук, профессора кафедры динамики и управления летательных аппаратов Московского авиационного института — посвящена всем трем способам полета. Начинается рассказ с аппаратов легче воздуха (воздушных шаров, аэростатов и дирижаблей), далее охарактеризованы аппараты, которые летают за счет аэродинамических сил, создаваемых крыльями и винтами, а завершает книгу раздел, посвященные реактивному движению. Описаны наиболее интересные этапы истории полетов; пути развития воздухоплавательной, авиационной и космической техники; физические принципы полета летательных аппаратов различных типов; трудности, которые приходилось преодолевать человеку при создании новой техники. Не забыты и первые «испытатели» летательных аппаратов — баран, утка и петух, поднявшиеся 19 сентября 1783 г. в небо на воздушном шаре братьев Монгольфье; собака Лайка, полетевшая в космос 3 ноября 1957 г. на втором искусственном спутнике Земли, и шимпанзе-астронавт Хэм, совершивший суборбитальный полет 31 января 1961 г. на космическом корабле «Меркурий-Редстоун-2». Интересны главы, посвященные необычным самолетам Берта Рутана, экранопланам, бесхвостке и летающему крылу. Рассказал автор и о трех своих студентах — Ю.В.Усачеве, М.В.Тюрине и Ф.Н.Юрчихине, ставших космонавтами.

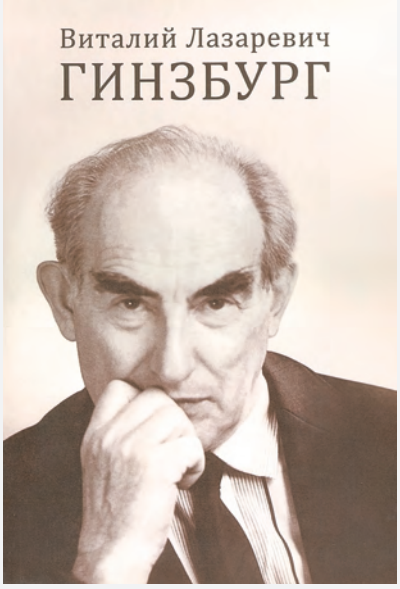
## География. Геология. Биология

**Н.М.Буднев, Ю.М.Зверева, В.А.Короткоручко и др.** ОЗЕРО БАЙКАЛ / Отв ред. М.Н.Кузьмин. М.: Российский фонд фундаментальных исследований, 2016. 108 с. (Специальный выпуск журнала «Вестник РФФИ». 2016. №1.)

В красочном альбоме, выпущенном РФФИ, приведена краткая история изучения Байкала, начиная от впечатлений первопроходцев XVII в. и заканчивая уникальными подводными исследованиями с использованием современных глубоководных обитаемых аппаратов XXI в. Приведены сведения о масштабных, многолетних научных проектах, реализуемых совместно с иностранными учеными. С 2001 г. РФФИ совместно с правительством Иркутской обл. (на условиях паритетного финансирования) проводят региональный конкурс проектов РФФИ «Приоритетные научные исследования по проблемам озера Байкал и Байкальского региона» («РФФИ-Байкал», с 2008 г. — «РФФИ-Сибирь»). За период 2001-2015 гг. поддержано более 220 проектов. Книга состоит из следующих глав: «Общие сведения о Байкале», «Человек на Байкале», «Геологическая история Байкала», «Живой мир Байкала», «От “расспросных речей»” — к системным научным исследованиям озера», «Подводные исследования с использованием глубоководных обитаемых аппаратов: “Пайсисы” и “Миры” на Байкале», «Уникальные байкальские научные проекты», «Байкальский музей — визитная карточка Байкала», «Сохраним мировое наследие — озеро Байкал для будущих поколений!».

## История науки. Физика

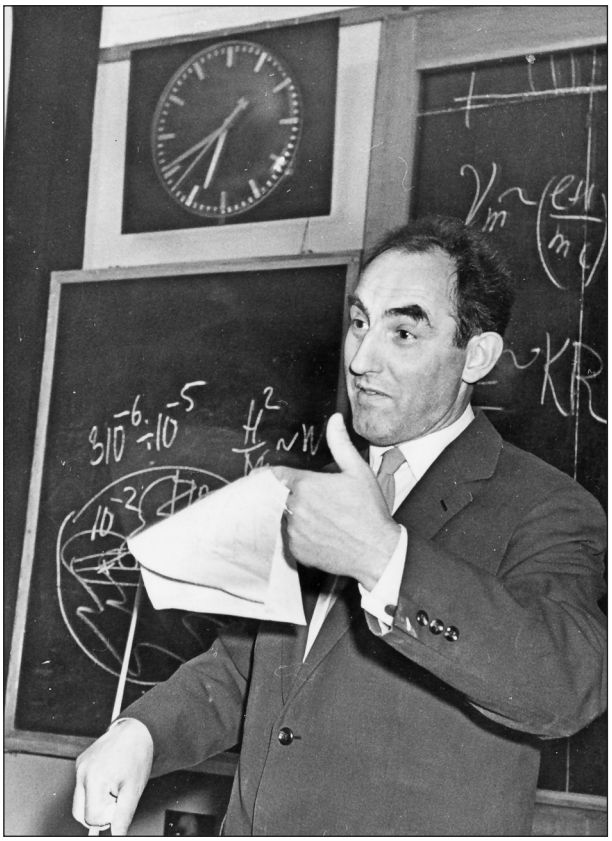
ВИТАЛИЙ ЛАЗАРЕВИЧ ГИНЗБУРГ: К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ / Авторы-составители: В.М.Березанская, М.А.Лукичёв, Н.М.Шаульская. Ярославль: Издательство «РМП», 2017. 200 с.

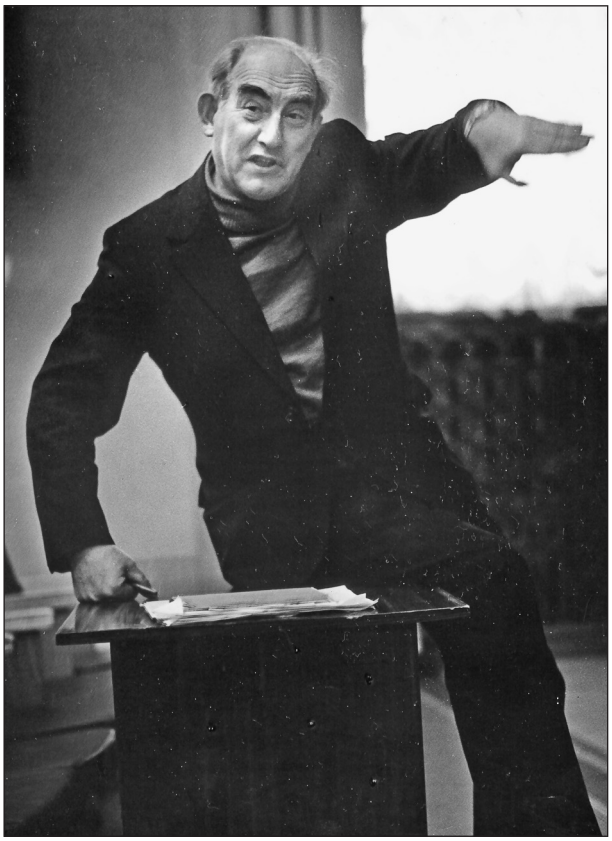


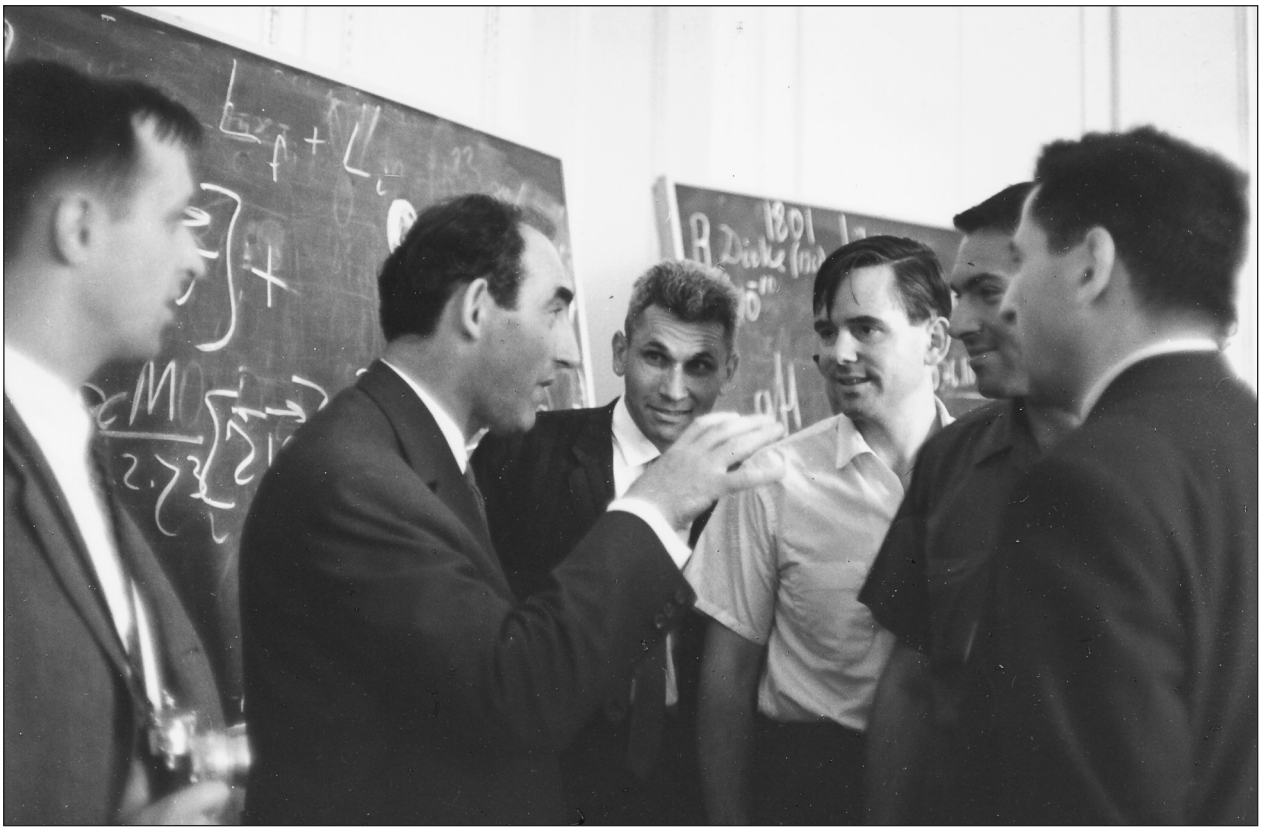

Книга-альбом посвящена физику-теоретику В.Л.Гинзбургу (1916–2009), одному из крупнейших ученых XX в., лауреату Нобелевской премии по физике (2003) и очень яркому человеку. Он был редким в настоящее время физиком-универсалом, знал все направления своей науки и сделал важные открытия в разных ее областях: в электродинамике, квантовой физике, физике атомного ядра. Своим трудами Виталий Лазаревич далеко продвинул знания о свойствах и протекании самых разных физических процессов — от ядерных реакций и излучения быстрых электронов во внешних полях до процессов в недрах гигантских звезд. Гинзбург был избран во многие иностранные академии и научные общества, в том числе в Лондонское королевское общество, Национальную академию наук США, Европейскую академию, Международную академию астронавтики, Академию наук и искусств США. Много лет он был членом редакционной коллегии, а затем и главным редактором журнала «Успехи физических наук». Еженедельный семинар по теоретической физике под его руководством в ФИАНе посещали физики всей страны и гости из-за рубежа.

Фотографии и документы представляют биографию Виталия Лазаревича — с первых и до последних дней его жизни. Источниками материалов стали: личные архивы Н.И.Гинзбург, И.В.Дорман и Л.Е.Чернышева; фонды Гинзбурга в архивах РАН, МГУ и ФИАНа; мемориальный кабинет В.Л.Гинзбурга, теоретический отдел и кабинет истории ФИАНа; музей физического факультета МГУ, журнал «Природа», а также личные архивы сотрудников ФИАНа. Фотографии и документы сопровождают рассказы о Виталии Лазаревиче его родных и близких, его учеников, сотрудников и друзей. Значительная часть текстов — воспоминания самого Гинзбурга, написанные им в разное время. Изобразительный материал и тексты в книге подобраны так, что они дополняют друг друга. Прочитав книгу и просмотрев ее как альбом, можно получить исчерпывающее представление о замечательном человеке и о том времени, когда ему довелось жить и работать.

Не оставляют равнодушными письма Виталия Лазаревича к жене, с которой он познакомился в конце 1946 г. Нина Ивановна была арестована в марте 1945 г. по подозрению, что якобы из окна ее квартиры на Арбате заговорщики собирались стрелять в И.В.Сталина. На следствии выяснилось, что она проживала с матерью в комнате окнами во двор, а комнаты с окнами на Арбат занимали чекисты. Была осуждена на три года лагерей, в сентябре 1945 г. освобождена по амнистии в честь Победы над фашистской Германией, но без права проживания в режимных местностях. Расписаться супруги смогли лишь в 1947 г., после чего Гинзбург начал просить прописать жену в Москве. С.И.Вавилов поддержал его заявления, но рассказал об отказе прописать сестру его жены (она была также сестрой жены президента Академии архитектуры В.А.Веснина). Позже заявления поддерживал Д.В.Скобельцын, брату которого отказывали в прописке в Москве. Чтобы видеться с женой, Гинзбург подрядился в качестве нагрузки заведовать кафедрой в Горьковском университете. Лишь в 1956 г. семья воссоединилась в Москве. А в 1980 г. Гинзбург первым приехал в Горький к сосланному туда сотруднику теоретического отдела ФИАНа академику А.Д.Сахарову.







Фотографии из книги-альбома: В.Л.Гинзбург на семинаре в ФИАНе (вверху) и с коллегами в Варшаве.

# Информация для авторов

Журнал «Природа» публикует работы по всем разделам естествознания: результаты оригинальных экспериментальных исследований; проблемные и обзорные статьи; научные сообщения и краткие рефераты наиболее примечательных статей из научных журналов мира; рецензии; персоналии; материалы и документы по истории естественных наук. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Статьи рецензируются и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию материалы можно прислать по электронной почте. Текст статьи, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате doc, txt или rtf. Иллюстрации предоставляются отдельными файлами. Принимаются векторные и растровые изображения в форматах EPS или TIFF (без LZW-компрессии). Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (Bitmap) — не менее 800 dpi. Векторные изображения должны быть выполнены в программе CorelDRAW или Adobe Illustrator.

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

ПРИРОДА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Президиум Российской академии наук

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

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

Подписано в печать 27.09.2017
Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная. Цифровая печать
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2
Тираж 310 экз. Заказ 1550
Цена свободная

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

Ответственный секретарь
**Е.А.КУДРЯШОВА**

Литературный редактор
**Е.Е.ЖУКОВА**

Художественный редактор
**Т.К.ТАКТАШОВА**

Заведующая редакцией
**И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА**

Научные редакторы
**М.Б.БУРЗИН**
**Т.С.КЛЮВИТКИНА**
**К.Л.СОРОКИНА**
**Н.В.УЛЬЯНОВА**
**О.И.ШУТОВА**

Перевод содержания
**Т.А.КУЗНЕЦОВА**

Графика, верстка:
**С.В.УСКОВ**

© Российская академия наук, журнал «Природа», 2017
© ФГУП «Издательство «Наука», 2017
© Составление. Редколлегия журнала «Природа», 2017

www.ras.ru/publishing/nature.aspx; www.naukaran.com/zhurnali/katalog/priroda/
При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.

ПРИРОДА
11 17

## в следующем номере

Имя Владимира Николаевича Ипатьева (1867–1952) теперь занимает подобающее ему место в истории отечественной науки: с 1994 г. Российская академия наук в честь ученого раз в три года присуждает премию по технической химии. Но этому предшествовало более чем полвека забвения, когда упоминание об Ипатьеве исчезло из энциклопедий, на его работы нельзя было ссылаться, о его трудах не рассказывали студентам. А заслуги Владимира Николаевича трудно преуменьшить: он был редким примером естествоиспытателя, достигшего выдающихся успехов и как исследователь-первопроходец, и как организатор новых производств на основе фундаментальных открытий. «Отец гетерогенного катализа», впервые введший в химическую практику использование высоких давлений и температур, осуществивший первый синтез ряда материалов, в том числе полиэтилена, создавший технологии переработки нефти и др., он по сути во время Первой мировой войны стоял у истоков российской химической промышленности и стал ее главой (по словам В.И.Ленина) после революции. Активно участвовал Ипатьев в первое десятилетие советской власти и в организации сети научных институтов. Однако история разорвала судьбу ученого на две части: в 30-х годах вынужденная эмиграция сохранила ему возможность работать, а вероятно, и саму жизнь. В США Владимир Николаевич продолжил свой блестящий научный путь, который был отмечен учреждением именной премии еще в 1947 г., но, несмотря на американское признание и советское отторжение, оставался до конца своих дней русским патриотом.

**РАЗДЕЛЕННАЯ СУДЬБА – НЕДЕЛИМАЯ ЖИЗНЬ**
К 150-летию академика В.Н.Ипатьева

Индекс 70707

ISSN 0032-874X. ПРИРОДА. 2017. №10. 1–96