

ISSN 0044-3948

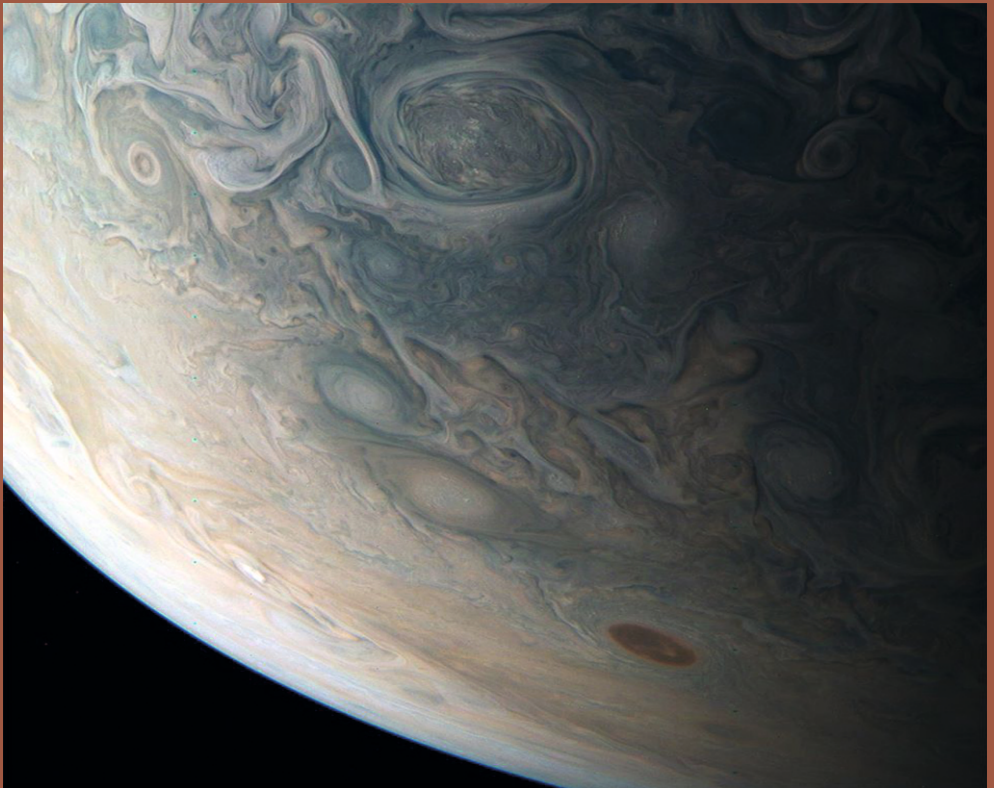
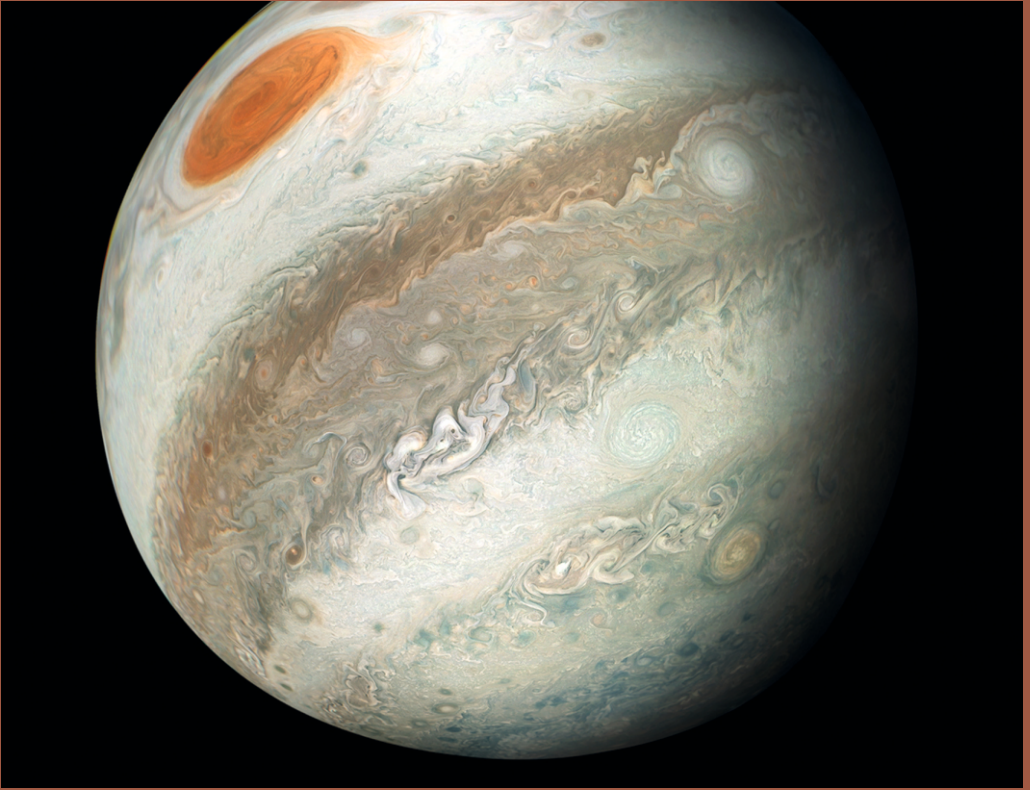
# ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

КОСМОНАВТИКА  
АСТРОНОМИЯ  
ГЕОФИЗИКА

СЕНТЯБРЬ–ОКТЯБРЬ 5/2018



К 90-летию  
ИФЗ РАН



Научно-популярный журнал  
Российской академии наук  
Издается под руководством  
Президиума РАН  
Выходит с января 1965 года  
6 раз в год  
Москва

# ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

5/2018



## Новости науки и другая информация:

Запуск "открывателя" экзопланет [15];  
Рождение черной дыры [41]; Самая  
древняя Галактика [54]; КТХ: галак-  
тическое скопление [80]; "Юнона":  
Юпитер крупным планом [93]; За-  
пуск и посадка на Марс АМС "Ин-  
сайт" [105].

## В номере:

- 3 ТИХОЦКИЙ С.А. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской академии наук: из прошлого в будущее
- 18 ТРУБИЦИН В.П. Уникальная тектоника Земли
- 29 ГУДКОВА Т.В. Тайны планетных недр
- 42 ШЕВЧЕНКО В.И., ЛУКК А.А. Автономное складко-надвиго-  
образование в земной коре
- 55 СОБИСЕВИЧ А.Л., СОБИСЕВИЧ Л.Е. Тайны Эльбрусской  
вулканической области
- 66 ЗАВЬЯЛОВ А.Д. Прогноз землетрясений: проблема и пути  
ее решения
- 81 ШАЛИМОВ С.Л. Ионосферный след от землетрясений и цунами

## СЛУЖБА СОЛНЦА

- 96 ИШКОВ В.Н. Солнце в апреле–мае 2018 г.

## ЛЮДИ НАУКИ

- 99 Памяти Азария Григорьевича Гамбурцева

## ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ АСТРОНОМИЯ

- 108 ЩИВЬЕВ В.И. Небесный календарь: ноябрь–  
декабрь 2018 г.



Zemlya i Vseennaya (Earth and Universe); Moscow, Profsoyuznaya str., 90, f. 1965, 6 a year; Joint edition of the Russian Academy of Science; popular, current hypotheses of the origin and development of the Earth and Universe; astronomy, geophysics and space research; Deputy Editor V.M. Kotlyakov; Deputy Editor S.P. Perov

**На стр. 1 обложки:** Вид Земли со стороны Индийского океана. Снимок сделан в июне 2018 г. российским метеорологическим ИСЗ “Электро-Л” № 2 (GOMS-3; запущен 11 декабря 2015 г.) из точки стояния 77,8° в.д. с расстояния 35 424 км. Научный центр оперативного мониторинга Земли Госкорпорации “Роскосмос”.

**На стр. 2 обложки:** вверху – Северная область Юпитера от 34,01° до 71,43° широты. Изображение составлено из снимков, полученных 1 апреля 2018 г. в течение 32 мин во время сближения АМС “Юнона” с Юпитером с расстояния от 17 329 км до 68 959 км. Фото NASA/JPL; внизу – Фрагмент северной области Юпитера в районе 32,9° широты. Снимок сделан 24 мая 2018 г. с помощью АМС “Юнона” с расстояния 5 659 км до Юпитера. Фото NASA/JPL (к стр. 93).

**На стр. 3 обложки:** вверху – Космическая обсерватория “TESS” на орбите. Рисунок NASA (к стр. 15); внизу – Американская АМС “InSight” проводит сейсмические исследования на поверхности Марса. Рисунок NASA/JPL (к стр. 105).

**На стр. 4 обложки:** Скопление галактик (на заднем плане), находящееся на расстоянии 160 Мпк; известно под названием SDSS J0333+0651, в Сверхскоплении Девы. Эффекты гравитационного линзирования проявляются в виде дуг, одну из которых можно наблюдать в верхней левой части изображения. Снимок получен в мае 2018 г с помощью КТХ. Фото NASA/ESA/JPL/STScI (к стр. 80).

### **In this issue:**

- 3 TIKHOTSKY S.A. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences: From the Past to the Future
- 18 TRUBITSYN V.P. Unique Tectonics of Earth
- 29 GUDKOVA T.V. Mysteries of Planetary Bowels
- 42 SHEVCHENKO V.I., LUKK A.A. Autonomous Folding and Thrust Formation in Earth’s Crust
- 55 SOBSEVICH A.L., SOBSEVICH L.E. Mysteries of Elbrus Volcanic Region
- 66 ZAVYALOV A.D. Prediction of Earthquakes: Problem and Ways of Solving
- 81 SHALIMOV S.L. Ionospheric Trace of Earthquakes and Tsunamis

### **SOLAR MONITORING SERVICE**

- 96 ISHKOV V.N. The Sun in April – May 2018

### **PEOPLE OF SCIENCE**

- 99 Memory of Azariy Grigorievich Gamburtsev

### **AMATEUR ASTRONOMY**

- 108 SHCHIV’YOV V.I. Celestial Calendar: November–December 2018

### **Редакционная коллегия**

главный редактор академик Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ  
зам. главного редактора доктор физ.-мат. наук С.П. ПЕРОВ,  
зам. главного редактора академик В.М. КОТЛЯКОВ,  
летчик-космонавт П.В. ВИНОГРАДОВ,  
зам. главного редактора кандидат филологических наук О.В. ЗАКУТНЯЯ,  
доктор исторических наук К.В. ИВАНОВ,  
летчик-космонавт А.Ю. КАЛЕРИ, кандидат физ.-мат. наук О.Ю. ЛАВРОВА,  
доктор физ.-мат. наук А.А. ЛУТОВИНОВ, зам. главного редактора доктор физ.-мат. наук О.Ю. МАЛКОВ,  
доктор физ.-мат. наук И.Г. МИТРОФАНОВ, академик И.И. МОХОВ,  
член-корр. РАН И.Д. НОВИКОВ, доктор физ.-мат. наук К.А. ПОСТНОВ,  
доктор физ.-мат. наук М.В. РОДКИН,  
научный директор Московского планетария Ф.Б. РУБЛЁВА,  
член-корр. РАН А.Л. СОБИСЕВИЧ, член-корр. РАН В.А. СОЛОВЬЁВ,  
академик А.М. ЧЕРЕПАЩУК, доктор физ.-мат. наук В.В. ШЕВЧЕНКО,  
член-корр. РАН Б.М. ШУСТОВ



## Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН: из прошлого – в будущее

*И они приняли рабочую гипотезу,  
что счастье – в непрерывном познании неизвестного  
и смысл жизни – в том же.*

А.и Б. Стругацкие

По традиции, историю нашего Института мы ведем от 1928 года, когда в составе Академии наук СССР на основании Постановления Совета народных комиссаров от 13 марта был образован Сейсмологический институт (СИАН). Инициатива его создания принадлежала первому директору Павлу Михайловичу Никифорову. За плечами 33-летнего П.М. Никифорова к этому моменту уже был опыт руководства отделом сейсмологии в Физико-математи-



ческом институте АН СССР, участие в многочисленных сейсмических и гравиметрических экспеди-

циях, целью которых было исследование, в частности, Курской магнитной аномалии, железорудных месторождений Кривокожья, трассы Туркестанской железной дороги. Им уже были созданы новые, передовые для того времени, компактные сейсмографы и гравитационные вариометры и разработаны теоретические основы гравиметрического и сейсмического методов изучения недр; проведены их полевые испытания и практическое внедрение<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Козенко А.В. П.М. Никифоров – основатель сейсмологического института АН СССР (к 125-летию со дня рождения) // История наук о Земле, 2009. Т. 2. № 2. С. 5–20.

Круг задач вновь созданного института был расширен: и развитие геофизических методов поиска полезных ископаемых, и оценка сейсмической опасности. Еще свежа была память о крымском землетрясении 1928 г., блестяще описанном Ильфом и Петровым. Это событие сделало очевидными необходимость систематического изучения сейсмичности территории СССР и важность развития сейсмических сетей. Растущая промышленность молодого государства, развитие инфраструктуры, в том числе в сейсмически опасных районах Средней Азии, Кавказа, Дальнего Востока – требовали как разведки и освоения минеральных ресурсов, так и обеспечения сейсмической безопасности возводимых объектов. Если в 1928 г. в СССР насчитывалось только три сейсмологические обсерватории, то к 1941 году стараниями сотрудников Института их стало уже двадцать<sup>2</sup>. В эти годы в СИАН были заложены основы сейсмического районирования: общего (первая карта ОСР была создана в 1937 году; на тот момент она не имела мировых аналогов), детального и микрорайонирования. Работы по сейсморайонированию были выполнены, в частности, при проектировании Турксиба,



*Первый директор Сейсмологического института АН СССР член-корреспондент АН СССР П.М. Никифоров. 1930-е гг.*

Суланской ГЭС, Транскавказской железной дороги. Эти работы заложили основные принципы технологии оценки комплексной сейсмической опасности: развертывание временных локальных сейсмических сетей для уточнения фоновой сейсмичности и определения реакции грунта; геолого-тектонические работы для поиска следов сильных землетрясений прошлого и инженерно-геофизические изыскания – для уточнения грунтовых условий. Эти же элементы, только в современной модификации, успешно используются в ИФЗ РАН и в других организациях и поныне. Мало того, в СИАН развивались и основы сейсмостойкого строи-

тельства и были разработаны первые в нашей стране соответствующие нормы и правила. Как писал в 1933 г. П.М. Никифоров в статье в газете “Вечерняя Москва”: «Ни одно сколько-нибудь ответственное строительство в сейсмических районах СССР не обходится без более или менее обстоятельной консультации со стороны СИАН». Отрадно отметить, что и в наши дни ИФЗ РАН является наиболее авторитетной организацией в области оценки сейсмической опасности, услуги которой при проектировании ответственных объектов востребованы не только в России, но и за рубежом.

П.М. Никифоров понимал важность развития фундаментальных физико-математических основ как сейсмологии, так и геофизической разведки. В СИАН был создан весьма сильный теоретический отдел под руководством замечательного математика Владимира Ивановича Смирнова, в котором трудился, в частности, молодой Сергей Львович Соболев, впоследствии ставший одним из крупнейших математиков XX в. В.И. Смирновым и С.Л. Соболевым была разработана теория функционально-инвариантных решений, она позволила разрешить важнейшие практические проб-

<sup>2</sup>Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта – М. : Наука, 1978. 92 с.

Основатель и первый директор ИФЗ АН СССР академик О.Ю. Шмидт. 1931 г.



лемы сейсмического метода, а затем нашла широкое применение в математической физике и различных разделах геофизики. Работы теоретиков СИАН позволили дать обоснование лучевому методу сейсмологии, что вывело на принципиально новый уровень сейсморазведку и сейсмологию<sup>3</sup>. Продолжались в СИАН разработка и мелкосерийное производство геофизической аппаратуры.

С момента рождения Института, с одной стороны, был непосредственно связан с решением насущных задач научно-технического развития страны, с другой, – проводимые исследования отличала фундаментальность, внимание к экспериментальным наблюдениям и теоретическим основам. Этот стиль работы и сейчас – визитная карточка ИФЗ РАН.

Необходимо помнить, что у современного Института

физики Земли был и другой “родитель”, на 9 лет моложе: в 1937 г. по предложению Отто Юльевича Шмидта был создан Институт теоретической геофизики АН СССР (ИТГ; Земля и Вселенная, 2011, № 4). Необычайная многогранность личности и широта интересов О.Ю. Шмидта хорошо известны: задачей нового Института он видел всестороннее изучение Земли, включая ее твердые оболочки, атмосферу и океан<sup>4</sup>. В эти же годы он начинал и работу над своей космогоничес-

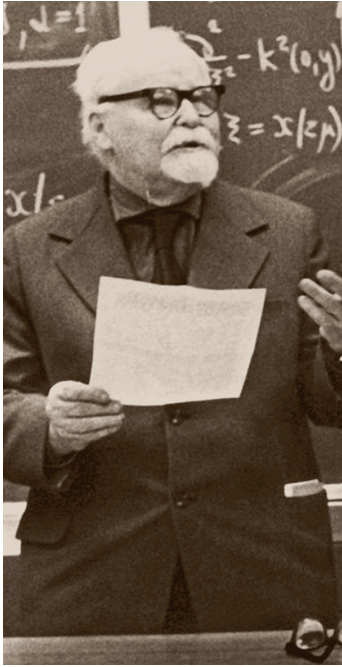
кой теорией, которой суждено было стать одним из крупнейших достижений мировой науки<sup>5</sup>. Одновременно О.Ю. Шмидт не забывал и о практических приложениях геофизики – как народнохозяйственных, так и оборонных. При этом, по воспоминаниям современников и документальным свидетельствам, фундаментальная и прикладная геофизика в ИТГ не разделялись – исследования строились на одних и тех же теоретических подходах и экспериментальных наблюдениях<sup>6</sup>. Это совершенно

<sup>3</sup>Соболев С.Л. Функционально-инвариантные решения волнового уравнения // Тр. Физико-математического института им. В.А. Стеклова, 1934. Т. 5. С. 259–264.

<sup>4</sup>Отто Юльевич Шмидт в истории России XX века и развитие его научных идей / Под ред. академика А.О.Глико. - М.: Физматлит, 2011. 680 с.

<sup>5</sup>Цицин Ф.А. К истории шмидтовской космогонии: истоки и горизонты / В кн. Отто Юльевич Шмидт в истории России XX века и развитие его научных идей / А.О. Глико (ред.). М.: Физматлит, 2011. С. 56–109.

<sup>6</sup>Козенко А.В. Развитие теоретической гравиметрии в Институте теоретической геофизики и геофизическом институте АН СССР // История наук о Земле, 2009. Т. 2. № 3. С. 5–19.



Академик А.Н. Тихонов – создатель факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ, основоположник теории регуляризации при решении некорректных обратных задач, в 1937–1953 гг. – заведующий отделом математической геофизики ИТГ АН СССР и ГЕОФИАН. 1960-е гг.

естественное отношение к единой по существу своему науке позволило ученым ИТГ достичь поистине выдающихся успехов как в изучении глубоких недр и физических полей Земли, так и в создании современных геофизических методов разведки. Несмотря на то что в прошедшие годы неоднократно предпринимались попытки противопоставить “чистую” и “прикладную” геофизику, отличительной чертой современного Института физики Земли РАН по-прежнему можно назвать совместное развитие и взаимное обогащение идеями и методами между пла-

нетарными, региональными и прикладными исследованиями.

В числе ведущих сотрудников ИТГ были крупнейший магнитолог П.П. Лазарев – руководитель работ по изучению Курской магнитной аномалии; создатель современной сейсморазведки Г.А. Гамбурцев (впоследствии директор ИФЗ АН СССР; Земля и Вселенная, 1979, № 1). Так же, как и в СИАН, в ИТГ был создан сильнейший отдел математической геофизики, который возглавил Андрей Николаевич Тихонов – впоследствии создатель теории некорректных обратных задач, имеющей самое широкое применение во всех разделах геофизики. Под его руководством в стенах ИТГ были, в частности, разработаны основы магнитотеллурических методов изучения внутреннего строения Земли. В наши дни развитие электромагнитных методов изучения Земли ведется в Центре геозлект-

ромагнитных исследований ИФЗ РАН. В ИТГ сложилась чрезвычайно сильная гравиметрическая школа, в нее входили Ю.Д. Буланже, А.А. Заморев, Е.Н. Люстих, Н.И. Идельсон.

В предвоенные и военные годы ИТГ совместно с СИАН внес определяющий вклад в разведку Волго-Уральской нефтегазоносной провинции – “второго Баку”. Это стало возможным благодаря разработанным в ИТГ под руководством Г.А. Гамбурцева способам гравиметрической разведки и сейсморазведки методами преломленных волн и отраженных волн. В 1941 г. за разработку принципов сейсмической разведки и аппаратуры для ее осуществления Г.А. Гамбурцеву была присуждена Государственная премия. В 1941–1942 гг. группа Григория Александровича вела разведку нефти в Ишимбайском районе Башкирии, в 1943–1944 гг. – в районе Апшеронского полуострова в Азербайджане. В эти же годы были проведены первые сейсморазведочные работы на Каспийском море, тем самым положено основание морской сейсмике<sup>7</sup>. С 1941 г. под руководством В.А. Казинского в ИТГ ведутся работы по измерениям силы тяжести на море.

<sup>7</sup> Г.А. Гамбурцев: Воспоминания, очерки, статьи – М.: ОИФЗ РАН. 1998 / Под ред. В.Н. Страхова и др. 268 с.



*Академик Г.А. Гамбурцев – создатель основ современной сейсмо-разведки, в 1938–1949 гг. – заведующий отделом физических методов разведки ИТГ АН СССР, в 1949–1955 гг. – директор ИФЗ АН СССР. 1941 г.*

---

В 1946 г. произошло объединение двух геофизических институтов: СИАН и ИТГ. Объединенный институт получил название Геофизического института АН СССР (ГЕОФИАН), его первым директором стал академик О.Ю. Шмидт. Освобожденный в 1942 г. от обязанностей вице-президента АН СССР О.Ю. Шмидт получил возможность вновь посвятить себя фундаментальной науке: в 1949 г. вышла его знаменитая книга “Четыре лекции о теории происхождения планет”. Идеи Отто Юльевича были восприняты не сразу, но впоследствии нашли полное подтверждение наблюдательными данными. Развитие идей О.Ю. Шмидта, работы по происхождению и ранней эволюции Земли и планет продолжают в ИФЗ РАН и в настоящее время.

---

*Сотрудники Ташкентской сейсмической станции ГЕОФИАН изучают реакцию грунтов на сейсмические воздействия при сейсмическом микрорайонировании территории Ташкента. 1964 г.*



В 1949 г. по предложению О.Ю. Шмидта директором ГЕОФИАН был назначен Г.А. Гамбурцев. С самых первых дней работы на новом посту Григорию Александровичу пришлось возглавить новую для него и чрезвычайно ответственную работу по изысканию методов прогноза землетрясений. Катастрофичес-

кое ашхабадское землетрясение 1948 г. (как когда-то крымское) вновь привлекло внимание к этой проблеме. Г.А. Гамбурцевым был разработан весьма подробный план исследований, в котором оказались предусмотренными практически все те задачи, над которыми и поныне трудятся поколения сейсмологов. Принципиально новым был переход от описательного подхода в сейсмологии к экспериментальному, теоретическое изучение очага землетрясения. В 1949 г. также была заложена основа Гармского прогностического полигона в Таджикистане.

Начиная с 1945 г., история Института тесным образом была связана с атомной промышленностью. В 1946–1951 гг. под руководством Г.А. Гамбурцева создавались методы поисков радиоактивных руд и велась их разведка; в 1951 г.





*Директор ИФЗ АН СССР академик М.А. Садовский (в центре) среди коллег-сейсмологов. 1970-е гг.*

директор ГЕОФИАН внес в Правительство страны предложение об организации службы наблюдений за ядерными взрывами<sup>8</sup>. В Институте была организована специальная сейсмометрическая лаборатория с двумя сейсмическими станциями. Широкое развитие работы по контролю за ядерными испытаниями получили в институте уже после его реорганизации в 1956 г., когда из состава ГЕОФИАН выделились институты Физики атмосферы (ИФА) и Прикладной геофизики (ИПГ). Работы по изучению твердой оболочки Земли и взаимо-

действию геосфер продолжались в Институте физики Земли АН СССР, которому было присвоено имя О.Ю. Шмидта.

В 1960-х гг. в спецсекторе и в ОКБ ИФЗ АН СССР была разработана высокочувствительная сейсмическая аппаратура для ее применения в составе службы контроля за ядерными испытаниями. Комплексная сейсмологическая экспедиция (КСЭ ИФЗ) под руководством И.Л. Нерсесова работала, в частности, над отысканием наиболее эффективных мест для установки этой аппаратуры. Все работы ве-

лись под непосредственным руководством директора ИФЗ академика Михаила Александровича Садовского (Земля и Вселенная, 2004, № 5); при его непосредственном участии велась подготовка к заключенному в 1962 г. Договору о запрещении испытаний ядерного оружия в трех средах: в воздухе, воде и в космосе. С этого момента сейсмический метод стал основным методом контроля за подземными испытаниями; в его создание и внедрение определяющий вклад внесли работы сотрудников ИФЗ АН СССР<sup>9</sup>.

В это же время в ИФЗ также были возобновлены работы по физике взрыва (такие исследования проводились М.А. Садовским в СИАН еще в довоенные годы), создана базовая кафедра МФТИ по этому направлению<sup>10</sup>. Проводились экспериментальные исследования на полигонах и в лаборатории, разработа-

<sup>8</sup> Гамбурцев А.Г., Гамбурцева Н.Г. Григорий Александрович Гамбурцев, 1903–1955/ Из сер. «Научно-биографическая литература». – М. : Наука, 2003. 300 с.

<sup>9</sup> Васильев А.П. Атомный проект СССР и развитие отечественной геофизики // История наук о Земле, 2009. Т. 2. № 3. С. 20–133.

<sup>10</sup> Калмыков А.А., Писаренко В.Ф. Краткий научно-биографический очерк о М.А. Садовском / В кн.: Михаил Александрович Садовский: очерки, воспоминания, материалы / отв. ред. А.В. Николаев. М. : Наука, 2004. С. 7–24.

тывались математические модели. В частности, была создана модель образования взрывной воронки от крупных взрывов. Позже эти работы нашли свое применение при моделировании импактного воздействия астероидов и метеоритов на поверхность планет. Помимо решения задач оборонного назначения, велись работы по мирному использованию энергии взрыва, в том числе – ядерного.

Зримым результатом этой работы стала, в частности, селезащитная плотина в Медео. До ее возведения городу Алма-Ата, расположенному у подножия северных отрогов Тянь-Шаня, постоянно угрожала опасность от грязекаменных потоков – селей, устремляющихся от ледников вниз по ущельям. В 1963 г. такой поток уничтожил часть поселка Есик, неподалеку от города; погибло множество людей, отдыхавших на горном озере. Поныне старые алмаатинцы помнят, как специалисты ИФЗ АН СССР изучали строение урочища Медео, планировали закладку шур-



фов и зарядов. В 1966 и 1967 гг. в результате произведенных двух направленных взрывов – на левом и правом берегу ущелья – с ювелирной точностью было передвинуто три миллиона кубометров горной породы на запланированное место. Через шесть лет – в 1973 г. – плотина спасла город от катастрофы, остановив селевой поток объемом 5,3 млн м<sup>3</sup>. Позже методом направленного взрыва были созданы плотины на реках Вахш, Бурлук, Уч-Терек, а также другие объекты<sup>11</sup>.

Как всегда, потребность в решении важнейших практических задач привела к необходимости изучения фундаментальных вопросов: в частности, была создана лаборатория физики высоких давлений. Полученные в лаборатории под руководством В.А. Калинина

результаты имели принципиальное значение для понимания важнейших вопросов строения глубоких недр: ядра и мантии Земли. Работы М.П. Воларовича и его учеников заложили основы механики горных пород при высоких давлениях.

Крупной вехой в истории ИФЗ стал Международный геофизический год. В ИФЗ под руководством В.А. Троицкой были развернуты широкие исследования по физике ионосферы и магнитосферы, литосферно-ионосферным и солнечно-земным связям. Для изучения электромагнитных полей в 1957 г. была создана Геофизическая обсерватория “Борок”; она расположилась в районе с низким уровнем антропогенного электромагнитного шума, на берегу Рыбинского водохранилища в Ярославской области. Изучение результатов

---

<sup>11</sup> Адушкин В.В. Творческий путь со взрывом / В кн.: Михаил Александрович Садовский: очерки, воспоминания, материалы / отв. ред. А.В. Николаев. М. : Наука, 2004. С. 62–77.

наблюдений за короткопериодными и низкочастотными пульсациями геомагнитного поля привело к разработке фундаментальных вопросов физики магнитосферы и ионосферы. Ныне обсерватория “Борок” ИФЗ РАН – уникальная комплексная среднеширотная геофизическая обсерватория, в которой ведутся исследования по ряду международных программ и проектов: здесь, в частности, расположилась одна из станций международной системы INTERMAGNET. В обсерватории так же сложилась уникальная школа в области изучения атмосферного электричества хорошей погоды.

С 1950-х гг. и до настоящего времени одним из важнейших направлений работы ИФЗ АН стали исследования природы сейсмичности, работы по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений. В 1960-е гг. в Институте закладывались основы физики очага землетрясения и была создана модель лавинно-неустойчивого трещинообразования, признанная в настоящее время во всем мире. Исследования по поиску предвестников землетрясений были развернуты, в частности, на Гармском сейсмопрогностическом полигоне в Таджикистане, который на долгие годы, вплоть до распада СССР, стал “местом при-

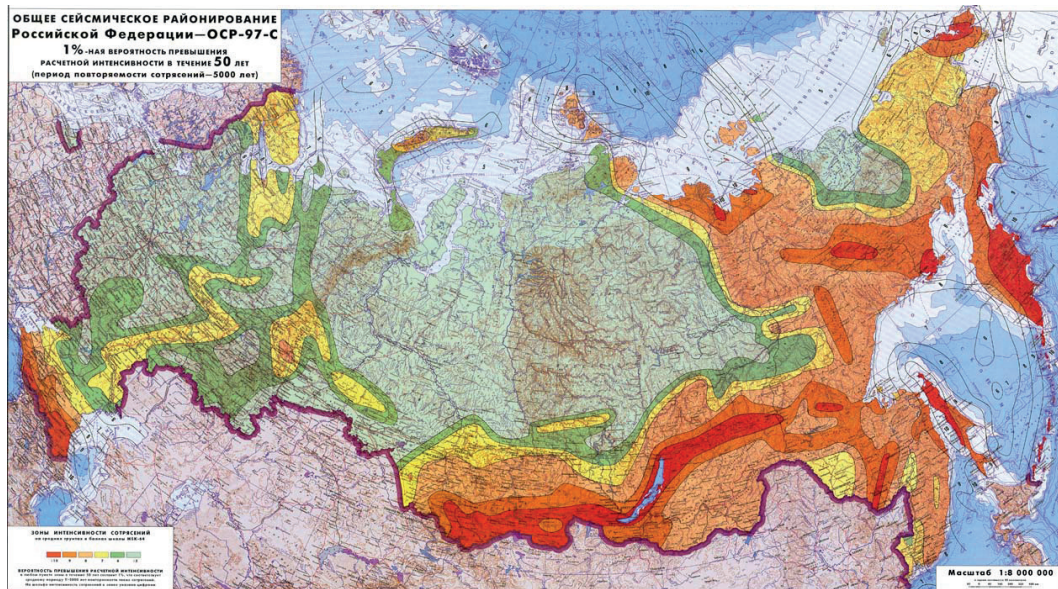
тяжения” не только для советских сейсмологов, но и для специалистов со всего мира. В разные годы работы также проводились на Ашхабадском и Ленинабадском полигонах, на Камчатке и на Курилах, в других сейсмоактивных регионах страны. Землетрясения не знают межгосударственных границ, поэтому сейсмологические наблюдения стали областью активного международного сотрудничества. В 1973 г. было заключено советско-американское соглашение об исследованиях в области физики землетрясений и их прогноза.

Несмотря на то что удалось обнаружить ряд явлений, которые можно характеризовать в качестве предвестников землетрясений, надежды, возникшие в 1950–1960-х гг. на создание надежных методов краткосрочного прогноза, не оправдались во всем мире. По мнению сейсмологов, главная причина заключается в том, что землетрясение – катастрофическое событие, возникающее в системе, находящейся в состоянии весьма далеком от равновесного. К нарушению устойчивости могут привести весьма малые воздействия – например, триггеры; даже колебания атмосферного давления или изменение уровня грунтовых вод. Отследить их все и предугадать их

совокупное влияние на среду практически невозможно. Кроме того, известно, что иногда подготовленное продолжительным накоплением напряжений сильное землетрясение “отменяется”: вместо катастрофического события происходит относительно медленная “криповая” деформация, которая приводит к разрядке упругой энергии без видимых последствий для людей. Работы по физике землетрясения, которые должны прояснить закономерности наблюдаемых сейсмических явлений, продолжаются в Институте, как и во всем мире, и сейчас.

Однако накопление и обобщение наблюдательных данных позволило достичь весьма существенного прогресса в долгосрочном и среднесрочном прогнозах землетрясений. Долгосрочный прогноз, по существу, представляет собой задачу сейсмического районирования, которая состоит в том, чтобы указать на вероятность возникновения в конкретной области на протяжении продолжительного (десятки или сотни лет) периода времени землетрясения определенной силы.

Как уже упоминалось, первая карта общего сейсмического районирования (ОСР) была создана в СИАН в 1937 г. С тех пор Институт неизменно является



Карта общего сейсмического районирования Российской Федерации “ОСР-97”, созданная в ИФЗ РАН. 1997 г.

головной организацией, ведущей разработку карт ОСР. Они являются нормативным документом, который утверждается органами государственной власти и обязателен к применению при проектировании любых зданий и объектов. В 1997 г. в ИФЗ РАН был создан комплект карт “ОСР-97”, в основу которого была положена принципиально новая методическая основа, предполагающая не просто обобщение информации по произошедшим землетрясениям, а количественный расчет сейсмических воздействий от сейсмогенерирующих структур – активных разломов. Впервые был применен вероят-

ностный подход к построению карт “ОСР”. Работы по созданию карт “ОСР-97” в 2002 году были удостоены Государственной премии Российской Федерации. В 2015 г. издана новая редакция карты “ОСР”, в ней были учтены некоторые новые данные о произошедших сильных землетрясениях последнего времени. В настоящее время в ИФЗ РАН ведется работа по подготовке нового комплекта карт сейсмического районирования, в основу которых положены современные методологические принципы: в них включена не только оценка интенсивности (в баллах), но и данные о пиковых ускорениях грунта

и иных характеристиках сейсмических воздействий, необходимых для проектирования сейсмостойких зданий и сооружений с использованием современных методов расчета. Эти работы ведутся в тесном взаимодействии со строителями и проектировщиками.

В ИФЗ РАН недавно разработан метод оценки вероятности возникновения сильных землетрясений на основе анализа долговременных записей сейсмического шума. Используются компьютерные методы обработки больших данных с использованием высокопроизводительных вычислений, позволившие, в частности,

дать предварительный среднесрочный прогноз разрушительного землетрясения Тохоку, произошедшего в 2011 г.

Необходимо отметить важнейший вклад, который ученые Института физики Земли вносят в изучение магнитного поля Земли. В 1960–1970-х гг. под руководством С.И. Брагинского в ИФЗ была разработана теория магнитного динамо, функционирующего в жидком внешнем ядре Земли и “ответающего” за формирование Главного магнитного поля нашей планеты. В работах Брагинского был разрешен ряд принципиальных трудностей формирования магнитного поля в потоке проводящей жидкости. Эти исследования затем получили признание и широкое развитие во всем мире.

Важнейшей задачей современных моделей геодинамо является воспроизведение в математической модели фактических закономерностей эволюции магнитного поля нашей планеты. Для того чтобы найти эти закономерности, ученые Института изучают магнитные свойства горных пород, образовавшихся в различные геологические эпохи: изверженные и осадочные породы (при их формировании) фиксируют информацию о величине и направлении магнитного поля в этот период.

Институт оснащен новейшим магнитометрическим оборудованием – сверхпроводящим магнитометром и иными приборными комплексами, которые позволяют с высокой точностью получать из образцов горных пород информацию об истории магнитного поля Земли. Результаты этих исследований используются, в частности, для того, чтобы усовершенствовать теорию магнитного динамо работы в этом направлении в ИФЗ РАН продолжают.

Другим фундаментальным результатом палеомагнитных исследований является реконструкция истории движений литосферных плит, которые приводили к формированию и распаду континентов, горообразованию и формированию океанских впадин. Чрезвычайно важным является изучение вероятного будущего магнитного поля Земли: оценка вероятности смены полюсов (инверсии) и иных относительно быстрых изменений конфигурации поля, которые могут ослабить защиту планеты от космического излучения. Эти направления на протяжении многих лет (и ныне) активно развиваются в Институте, а полученные результаты имеют широкое международное признание.

Среди фундаментальных направлений исследований

Института необходимо выделить исследования по глобальной и региональной геодинамике; они проводятся с использованием разных методов, начиная с середины XX в. Широкое признание в мире получили работы по моделированию мантийной конвекции: в частности – достижения в отношении роли континентальных литосферных плит в регуляции конвективных течений. Важнейшее значение имеют результаты в области физико-химических преобразований вещества в земной коре и в мантии и их роли в формировании вертикальных движений, они находят применение в обосновании принадлежности части Арктического шельфа Российской Федерации.

Известны достижения ученых ИФЗ в области изучения глубинного строения Земли с использованием методов сейсмологии: в стенах Института был создан, в частности, метод “приемных функций”, который позволяет устанавливать с высокой точностью рельеф глубинных сейсмических границ. Разработан SKS-метод изучения сейсмической анизотропии (которая связана с упорядоченной ориентировкой зерен минералов) возникающей как следствие течений в мантии. Применение этих методов позволило установить многие важные осо-

*Разработанный в ИФЗ РАН самолет-лаборатория для проведения аэрогравиметрической съемки.*

---

бенности строения и эволюции литосферы и мантии Земли.

Учеными ИФЗ развиты новые модели деформирования горных пород различного генезиса; они позволяют объяснить наблюдаемые закономерности в формировании региональных и локальных структур. В стенах Института зародилось и активно развивается тектонофизическое направление исследований, ведутся исследования в области вулканологии.

Со времени опубликования работ академика О.Ю. Шмидта по космогонической теории в Институте не прекращались исследования планет и их спутников. Пионерские работы в области уравнивания состояния вещества планет-гигантов были выполнены в ИФЗ в 1960–1970-е годы. Фундаментальные результаты получены при изучении глубинного строения Луны, Марса и Венеры. В Институте создаются приборы, которыми оснащаются исследовательские космические аппараты. Комплексы, разработанные в ИФЗ РАН, установлены, в частности, на Международ-



ной космической станции.

Институт продолжает активно развиваться. Жизнь, потребности общества и государства, внутренняя логика развития фундаментальной науки ставят перед учеными ИФЗ РАН новые задачи.

Необходимость точного изучения гравитационного поля Земли привела специалистов Института к созданию современного приборно-методического комплекса для аэрогравиметрических измерений, с его помощью мы можем получать карты поля земной силы тяжести (в том числе – над акваториями) с точностью и масштабом, которые были ранее доступны только при проведении наземных съемок. Эти работы были удостоены в 2005 г. Премии Правительства Российской Федерации. Использование современных методов космической геодезии, включая системы ГЛОНАСС и GPS и данные радарной спутниковой интерферо-

метрии, позволяет специалистам ИФЗ РАН решать как фундаментальные, так и прикладные задачи. В частности, оказывается возможным по спутниковым данным не только следить за перемещениями литосферных плит и уточнять механизмы очагов сильных землетрясений, но и вести мониторинг оползней, оценивать просадку зданий и сооружений, а также обнаруживать техногенные деформации земной поверхности в областях разработки полезных ископаемых.

Истощение традиционных запасов нефти требует разрабатывать трудно извлекаемые ресурсы: сланцевую нефть, месторождения арктического шельфа, а также повышать эффективность извлечения углеводородов из старых месторождений. Для этого требуется не только совершенствование методов геофизической разведки, но и разработка способов повышения нефтеотдачи,



*Установка автономной сейсмической станции в Республике Бангладеш с использованием солнечных панелей для обеспечения длительной работы.*

том числе – покрытых льдом. В сотрудничестве с предприятиями промышленности ведется разработка соответствующих приборов и оборудования.

Ограниченный объем юбилейной статьи не позволяет по достоинству охарактеризовать все направления работы Института, многое осталось за рамками этого текста. Статьи ученых ИФЗ РАН, помещенные в этом выпуске журнала, призваны дать более широкое и полное представление о масштабах работы и задачах, стоящих перед нашим коллективом.

а также снижение экологических и иных техногенных рисков при разработке. Для решения этих задач необходимо глубокое понимание физики и механики горных пород и процессов, происходящих в процессе освоения месторождений. В ИФЗ РАН развернуты широкие экспериментальные и теоретические исследования в области нефтегазовой и прикладной геофизики, они ведутся в тесном взаимодействии с предприя-

тиями нефтегазовой отрасли и по их заказам.

Важность изучения Арктического шельфа России побудила ученых Института создать ряд новых методов сейсмических исследований акваторий, в

*Сейсмоакустические эксперименты, инициированные ИФЗ РАН и АО Концерн «МПО «Гидроприбор»», выполняют П.Д. Груздев и А.Л. Собисевич на Ладого. 2017 г.*





Институт устремлен в будущее. Тесное сотрудничество с МГУ, Московским физико-техническим институтом, с другими ведущими вузами, где ученые ИФЗ РАН читают лекции и руководят научной работой студентов, обеспечивает приток молодежи в стены ИФЗ. Возможность проводить исследования на современном оборудовании, романтика полевой и экспедиционной жизни, интересные зада-

чи – все это привлекает молодых людей. В последние годы увеличивается прием в аспирантуру ИФЗ РАН, в диссертационном совете защищают все больше не только кандидатских, но и докторских диссертаций.

Институт меняется: мы адаптируемся к новым реалиям, внедряем современные технологии, развиваем обсерваторскую сеть, активно включаемся в реализацию Стратегии научно-технологического развития

России, расширяем международное сотрудничество. Но и остаемся верны нашим традициям, сформировавшимся за 90 лет истории Института: традициям научной честности, ответственности и преданности нашему делу.

*С.А. ТИХОЦКИЙ,  
член-корреспондент РАН  
директор  
Института физики Земли  
им. О.Ю. Шмидта РАН*

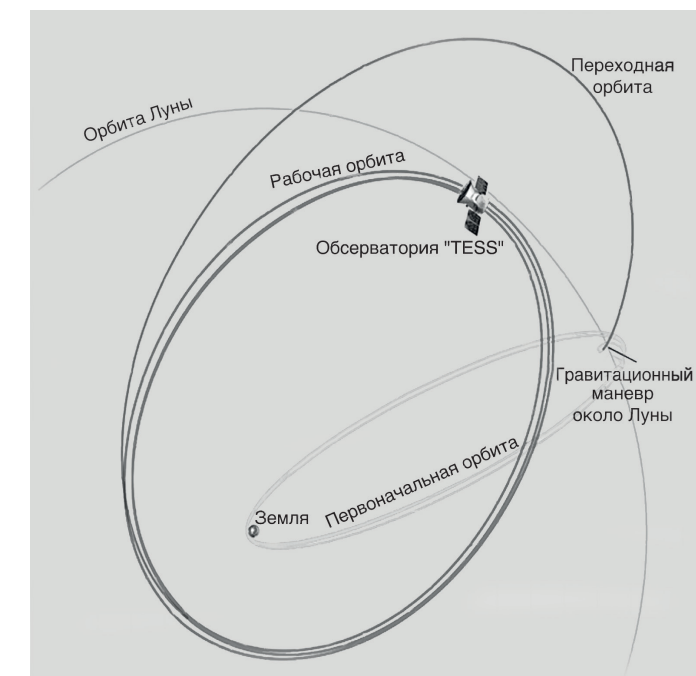
---

## Информация

---

### Запуск “открывателя” экзопланет

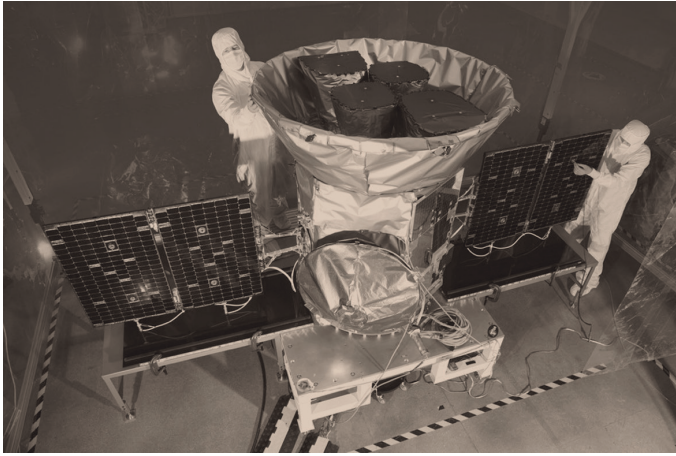
18 апреля 2018 г. со стартовой площадки SLC-40 космодрома Канаверал с помощью РН “Фалькон-9” (принадлежит частной компании “SpaceX”) запущена американская космическая обсерватория “TESS” (Transiting Exoplanet Survey Satellite – спутник наблюдения за экзопланетами транзитным методом). 18 мая 2018 г. с помощью одной из четырех камер обсерватории сделан тестовый снимок 200 тысяч звезд. После завершения ис-



Рабочая орбита космической обсерватории “TESS”. Рисунок NASA.

пытаний приборов снимки “TESS” будут охватывать участок неба, в 400 раз пре-

восходящий тестовый. В середине июня 2018 г., после двух месяцев орбитальных

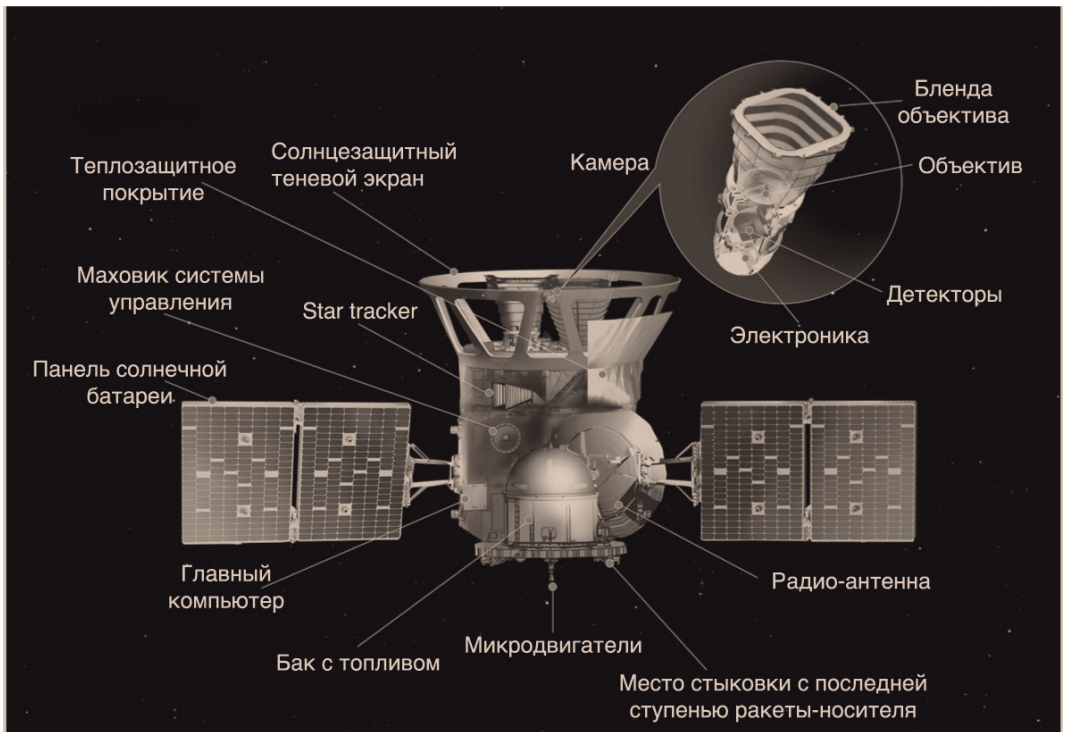


Процесс сборки космической обсерватории "TESS" в Массачусетском технологическом институте. Рисунок NASA/JPL.

маневров и проверки работы систем, обсерватория приступила к выполнению своей научной программы. Аппарат

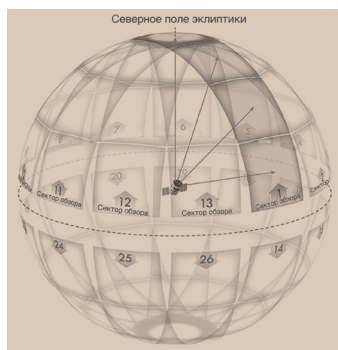
вышел на высокоэллиптическую околоземную орбиту высотой в перигее 108 тыс. км, в апогее – 375 тыс. км. "TESS"

делает два витка за 27,3 суток (за это время Луна делает полный оборот вокруг Земли). Этот тип орбиты наиболее удобен: он позволит обсерватории проводить большую часть своего времени в темноте, и легко обмениваться данными с наземными службами с минимальными помехами от солнечного света – в отсутствии космическо-



Устройство космической обсерватории "TESS" и ее научная аппаратура. Рисунок NASA.

Две полусферы небосвода с полосами, их сканируют с помощью телескопов космической обсерватории "TESS" (слева), и Южное полушарие неба с секторами, которые наблюдали с ее помощью в течение первого года работы (справа). Каждые два витка орбиты сдвигается поле обзора телескопов. Справа приведена шкала времени: показано, в какой из периодов с помощью телескопов будет обследован определенный сектор неба. Рисунок NASA.



го мусора и сильного излучения – которые способны вывести аппаратуру из строя. Каждые 13,7 дней “TESS” сближается с Землей и передает собранные данные (см. стр. 3 обложки, вверху). Работа обсерватории рассчитана на два года, но экономно расходуя топливо, она может быть продлена на несколько десятилетий.

Обсерватория “TESS” длиной 1,5 м, диаметром 1,2 м (размах двух панелей солнечных батарей – 3,9 м, мощность – 433 Вт) и массой 350 кг оснащена четырьмя широкоугольными оптическими телескопами-рефракторами с апертурой 10 см и полем зрения  $24^\circ \times 24^\circ$ ; они охватывают участок неба в виде вытянутой полосы площадью около 10 тыс. полных лун. В рабочее тело каждого телескопа встроены ПЗС-камеры с разрешением 67,2 Мп; которые

способны работать в спектральном диапазоне – от 600 до 1000 нм. Обсерватория создана Массачусетским технологическим институтом по программе “Explorer” NASA; руководитель программы исследований – Дж. Рикер (Институт астрофизики и космических исследований им. Кавли, США).

Обсерватория “TESS” является продолжением успешной работы (в 2009–2016 гг.) космической обсерватории NASA “Кеплер” (Земля и Вселенная, 2011, № 6; 2014, № 5). Однако, в отличие от обсерватории “Кеплер”, новая миссия сосредоточится на звездах, в 100 раз более ярких; отберет наиболее подходящие из них для детального изучения и определит цели для будущих программ. Главная цель программы, названной “Миссия века”, – находить экзопланеты размером с Землю (попадающие в обитаемую зону), удаленные от нас не более чем на 200 св. лет. Обсерватория “Кеплер”, несмотр-

ря на то, что открыла более 2600 экзопланет, проводила исследования объектов на удалении до 3 тыс. св. лет. По плану, “TESS” в течение года будет сканировать сначала Южное полушарие неба (оно поделено на 26 секторов площадью  $24^\circ \times 96^\circ$ ); каждый сектор будет исследован в течение 27 суток; на следующий год – та же работа в Северном полушарии неба. Данные, полученные с помощью обсерватории “TESS”, будут не только содержать результаты измерения яркости целевой звезды (в течение двух минут), но и изображения полного неба (каждые полчаса), захватывающие более 20 млн звезд и 10 млн галактик. Предполагается, что с помощью обсерватории ученые откроют более 20 тыс. экзопланет, из которых от 500 до 1000, возможно, будут планетами земного типа, с орбитальными периодами до 2 месяцев; 70 планет – в обитаемой зоне, все они будут вращаться вокруг красных карликов, а 11 из этих 70-ти будут иметь радиус не более  $2 R_\oplus$ . Для этого будут исследованы ближайшие к Земле 500 тыс. звезд спектральных классов G, K и M ярче  $12^m$  и около 1000 ближайших красных карликов. В итоге “TESS” за два года должна исследовать 85% небосвода.

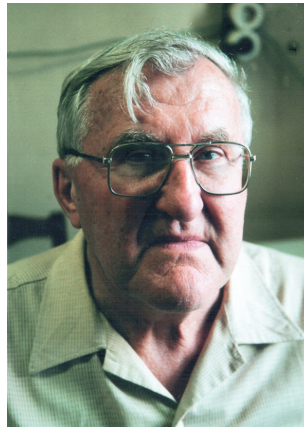
*Пресс-релиз NASA,  
19 апреля 2018 г.*



## Уникальная тектоника Земли

В.П. ТРУБИЦЫН,  
член-корреспондент РАН  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
Институт теории прогноза землетрясений РАН

Только на Земле верхняя холодная жесткая литосфера течениями тепловой конвекции представляет собой систему жестких литосферных плит, которые участвуют в конвективном кругообороте вещества мантии. Плиты сцеплены между собой, а при их “срыве” возникают землетрясения. На Земле кора не сплошная, она состоит из нескольких континентов, плавающих на поверхности среди литосферных плит, которые то “примерзают” к континентам, то отрываются



от них. Континенты время от времени объединяются в суперконтиненты, а затем расходятся.

При высокой интенсивности тепловой конвек-

ции на всех тектонически активных планетах горячие восходящие потоки тепловой конвекции приобретают форму узких струй – плюмов. Однако, только на Земле плюмы, прорываясь на поверхность движущихся плит, образуют на них цепочки застывающих вулканов. В настоящее время глобальная тектоника литосферных плит, плавающих континентов и мантийных плюмов может быть воспроизведена в процессе численного моделирования.

### СИЛИКАТНЫЕ ПЛАНЕТЫ

Солнечная система образовалась в результате гравитационной неустойчивости газопылевого облака. Большая часть ве-

щества первичного состава сконцентрировалась в Солнце; из остатка облака возникли планеты. До их образования в гравитационном поле Солнца происходила дифферен-

циация вещества облака по химическому составу. В Солнечной системе возникли две группы планет: близкие к Солнцу планеты земной группы, состоящие из силикатных ман-

тий и железных ядер, и дальние планеты-гиганты, состоящие в основном из легких элементов (водород, гелий, вода, метан, аммиак). Вначале, после образования планет, их недра были очень горячими, а затем в процессе эволюции остывали; при этом быстрее остывали менее массивные планеты. Температуры поверхности планет земной группы варьируют, примерно от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+500^{\circ}\text{C}$ ; поскольку они ниже температуры плавления силикатных пород, то все планеты земной группы имеют твердые оболочки-литосферы.

Температуры поверхности планет-гигантов варьируют в пределах от  $-100$  до  $-200^{\circ}\text{C}$ . До середины 1950-х гг. предполагалось, что недра планет-гигантов успели остыть, и при очень высоком давлении вещество недр этих планет могло стать твердым; поэтому долгое время планеты-гиганты считались ледяными, имеющими толстую газовую атмосферу. Однако измерения показали, что из недр Юпитера поступает небольшой поток тепла. На основании этих данных в ИФЗ РАН в 1966 г. автором статьи определена температура в центре Юпитера: 20 000 К. При таких температурах (даже при очень высоких давлениях) водород и гелий хотя по своим свойствам и становятся более по-

хожими на жидкость, но не затвердевают. Доктор физико-математических наук В.Н. Жарков и автор статьи рассчитали форму и гравитационное поле гидростатически равновесного вращающегося Юпитера. Измерения, выполненные при пролетах АМС “Пионер-10” 4 декабря 1973 г. и “Пионер-11” 3 декабря 1974 г., подтвердили соответствие газожидкому состоянию Юпитера. Эта концепция о газожидком состоянии всех планет-гигантов стала общепринятой.

Кроме “силикатных” планет земной группы и Луны в Солнечной системе есть еще два больших спутника Юпитера – Ио, состоящий из силикатов, и Европа, у которого поверх силикатной мантии плещется аномально глубокий водный океан, покрытый 100-километровым слоем льда.

Несмотря на вековое остывание (благодаря выделению тепла радиоактивных изотопов недр) силикатные планеты и спутники до сих пор горячие и размягченные; в их мантиях продолжается тепловая конвекция, она и является движущей силой всех тектонических проявлений на этих планетах.

Для характеристики тектонической активности силикатных планет и спутников Р. Штерн (США), Т. Геря и П. Такли (Швейцария) в 2018 г. ввели понятие условного индекса

активности и показали, что он равен трем – для Земли и Венеры, двум – для Марса, Ио и Европы, одному – для Меркурия и нулю – для Луны. Благодаря малым размерам в Меркурии тепловая конвекция затухает, а Луна почти затвердела.

Холодная твердая оболочка силикатных тектонически активных планет – литосфера – состоит из двух частей: легкой коры, выплавленной из силикатной мантии, и верхнего холодного слоя мантии. Вследствие этого толщина и прочность литосферы двояко зависят от температуры недр. В недрах менее горячей планеты возникает более толстый мантийный слой литосферы; в слишком горячей – наиболее толстая кора. В результате на всех планетах земной группы (кроме Земли) литосфера покрывает всю поверхность в виде цельной плиты и представляет собой тепловую и механическую “крышку”. Например, в недрах Марса горячее вещество прорывается через литосферу только в виде отдельных мощных струй, порождающих большие вулканы. На Венере – тепло долгое время накапливается под литосферой; затем горячее вещество взрывается и перемешивается (это происходит лишь эпизодически). Поскольку вещество, находящееся на поверхности Венеры,

имеет возраст около 0,5 млрд лет, то предполагается, что таков же интервал между “перестройками” ее литосферы.

#### ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИКИ ЗЕМЛИ

Мантия Земли нагревается снизу потоком тепла, идущего из ядра, и изнутри – при распаде радиоактивных элементов. Поэтому в мантии при перепадах температур около 4000°С происходит интенсивная тепловая конвекция.

Только на Земле (в частности, благодаря размягчению водой) литосфера под океанами (состоит из коры толщиной 6 км и холодного слоя мантии толщиной в среднем 60 км) оказалась относительно не такой толстой и непрочной; благодаря этому течения тепловой конвекции постоянно “раскалывают” литосферу на части – литосферные плиты. Они, подобно ледоходу на реке, мантийными течениями перемещаются по поверхности.

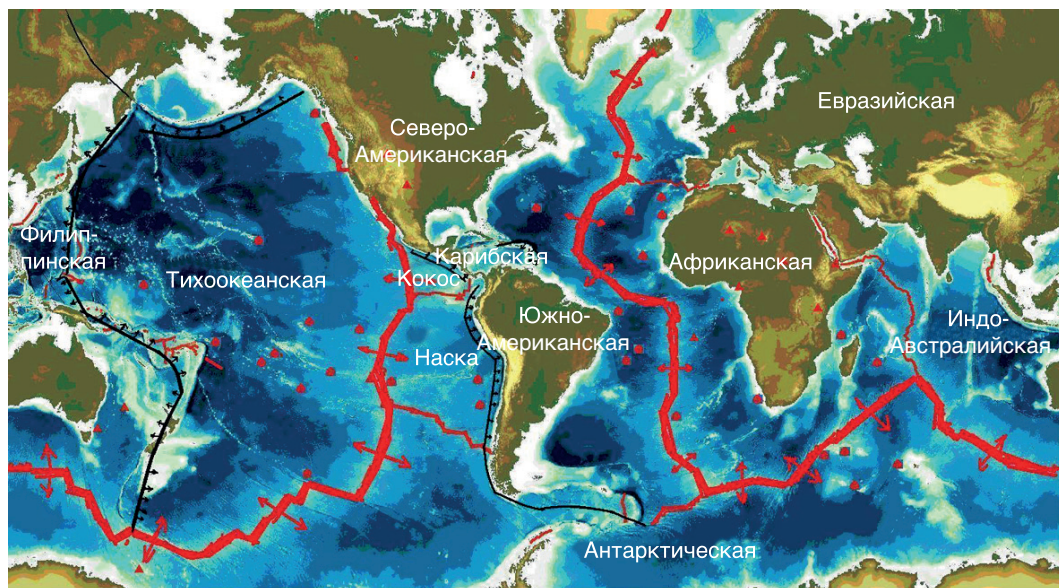
Главное отличие литосферных плит от льдин состоит в том, что лед легче воды и не тонет; а вещество плит имеет состав, близкий к мантийному, но оно более холодное и, следовательно, более тяжелое. По этой причине плиты, подобно листам фанеры на воде, с одного края погружаются в ман-

тию, в результате дно океанов перемещается подобно конвейерным лентам, движущимся со скоростями порядка 1–10 см в год и обновляющимся в среднем через 60 млн лет. Земля составлена из семи крупных плит, нескольких средних и множества мелких. На шести крупных плитах находятся континенты, и только одна, большая, не имеет континента – Тихоокеанская плита. Границы между плитами могут быть трех видов: дивергентные, трансформные и конвергентные; в них плиты, соответственно, рождаются, смещаются друг относительно друга и погружаются в мантию.

Рождаются плиты в срединно-океанических хребтах. Система этих хребтов представляет собой гигантскую трещину в литосфере, опоясывающую всю Землю. С севера она идет через Атлантический океан, далее огибает с юга Африку, проходит с запада на восток через Индийский океан, огибает с юга Австралию, идет с юга – на север через Тихий океан, уходит под Северную Америку, поворачивает под Евразию. В будущем она может “замкнуться” через Северный Ледовитый океан. В эту трещину снизу из мантии постоянно поступает горячее вещество, оно расталкивает плиты и “примерзает” к ним. Со стороны молодого Атлантического океана дно “при-

морожено” к континентам Северной и Южной Америки, Евразии и Африки (такие окраины континентов называют пассивными). Поскольку плиты расходятся в разные стороны (каждая со скоростью около 1,5 см в год), то в результате Атлантический океан расширяется со скоростью около 3 см в год. Горячее вещество, выходящее из мантии в хребте Тихого океана, также “расходится” в стороны и “примерзает” к плитам. Самая большая на Земле Тихоокеанская плита движется на северо-запад со скоростью около 10 см в год, охлаждается, становится тяжелой и погружается в мантию в зонах субдукции под Курильские острова, Камчатку и Японию. Вещество хребта, движущееся на восток, также наращивает плиты Наска и Кокос, которые погружаются в зонах субдукции, соответственно, под континенты; Южная Америка и Северная Америка. Такие окраины континентов называют активными.

Благодаря силе трения, движущиеся с разными скоростями плиты, постоянно деформируясь, долгое время остаются сцепленными. Когда же напряжения достигают критического значения, то возникают локальные разрывы между плитами, вызывающие землетрясения. При этом раздробленность ли-



Карта современной поверхности Земли. Толстой красной линией показана система срединно-океанических хребтов, в которых горячее вещество выходит из мантии и, застывая, “наращивает” плиты. Красными кружками отмечены горячие точки Земли – места выхода на поверхность мантийных плюмов – горячих конвективных струй, поднимающихся со дна мантии (Schubert et al., 2014).

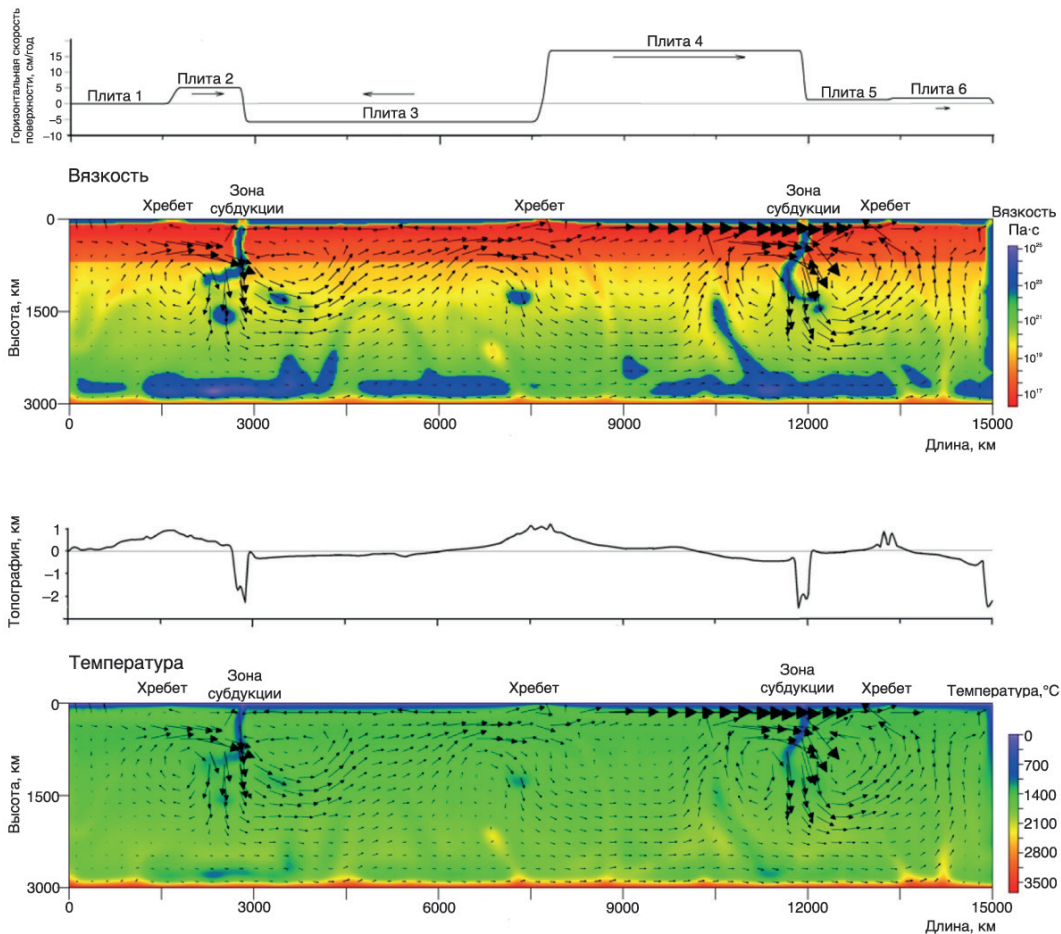
тосферы на плиты не дает возможности накапливаться катастрофическим напряжениям, которые могут спровоцировать катаклизм.

Океаны на Земле занимают только 70% земной поверхности, остальная часть занята континентами, состоящими из коры средней толщиной 50 км и нижележащей холодной части мантии, с “корнями” толщиной до 200 км. Второй особенностью тектоники Земли является то, что континентальная кора, выплавившаяся из мантии, покрывает поверхность Земли не сплошь (как на других планетах), а только

местами – образуя шесть континентов и несколько крупных островов.

В 1912 г. немецкий геофизик и метеоролог, создатель теории дрейфа материков Альфред Вегенер, еще на примере Пангеи (суперконтинента, существовавшего в конце палеозоя и начале мезозоя, объединявшего практически всю сушу Земли 335–175 млн лет назад) показал, что континенты дрейфуют, объединяются в суперконтиненты и затем опять расходятся. Эти процессы были поняты только после открытия конвекции в мантии Земли и тек-

тоники литосферных плит. “Легкие” континенты плавают на вязкой мантии, среди океанических плит, которые временно “примерзают” к континентам, но потом, охлаждаясь и утяжеляясь, погружаются в мантию. В мантии вещество плит нагревается, размягчается, размешивается и выходит на поверхность в срединно-океанических хребтах. За время дрейфа континента в течение нескольких миллиардов лет океанические плиты “примерзают” к нему и отрываются от него много раз. В настоящее время основные физические



Модель конвекции в мантии с вязко-пластической реологией (расчет автора). Распределения вязкости (а) и температуры (б), возникающие при конвекции; показаны цветом, шкалы приведены справа. Скорость течений показана стрелками, с максимальным значением 15 см в год. Вверху приведено распределение горизонтальных скоростей движения возникших плит. Верхняя, холодная высоковязкая литосфера, мантийными течениями была разбита на шесть плит: с тремя хребтами и двумя зонами субдукции.

процессы глобальной тектоники Земли поняты, в частности, благодаря математическому моделированию.

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ, ВОСПРОИЗВОЖДАЮЩИЕ ТЕКТОНИКУ ЗЕМЛИ

Литосферные плиты. Представления тектоники литос-

ферных плит были сформулированы зарубежными учеными в 1950-х гг. на основании данных, полученных в результате наблюдений дна Мирового океана. Количественная теория участвующих в конвекции литосферных плит основана на решении уравнений тепловой кон-

векции в жидкости, вязкость которой в значительной степени зависит от температуры и возникающих в жидкости напряжений, продолжает уточняться по настоящее время.

Для того, чтобы проиллюстрировать процесс “разбивания” океанической ли-



тосферы на отдельные плиты, в 2012 г. автором в ИФЗ РАН были проведены численные эксперименты. Рассмотрен нагреваемый слой жидкости с вязкостью, зависящей от температуры и давления, соответствующей силикатному веществу мантии. В слое возникает тепловая конвекция. При этом вязкость верхнего, более холодного слоя оказывается очень высокой, порядка  $10^{26}$  Пас, что соответствует вязкости литосферы. Далее было учтено свойство эффективной пластичности вещества Земли (с учетом микротрещин и содержания воды), при которой вязкость вещества зависит не только от температуры и давления, но и от напряжений. Это приводит к тому, что в местах повышенного напряжения повышается концентрация микротрещин и эффективная вязкость вещества значительно падает. Наибольшие напряжения при конвекции возникают над нисходящими конвективными течениями в утолщенной части литосферы.

В процессе моделирования было показано, что в слое нагретой жидкости с вязко-пластической реологией вещества, соответствующей веществу мантии Земли, возникает конвекция. При этом верхний высоковязкий слой – литосфера – разбивается на несколько жестких

плит, каждая из которых движется со своей скоростью, утолщается по мере удаления от хребта и погружается в мантию в зонах субдукции. Рассчитанный рельеф дна океана показывает глубоководные впадины и области подъема дна в хребтах.

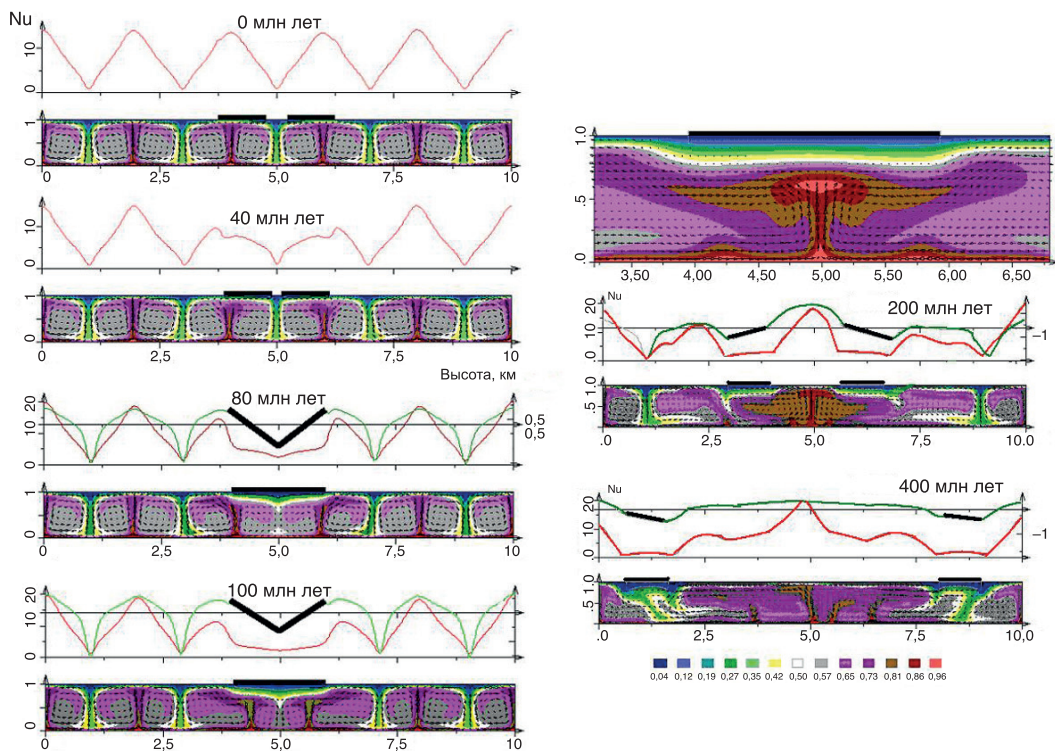
Рассчитанные в этой модели поля температур и вязкости в мантии, а также скорости конвективных течений, скорости плит и рельеф дна океана очень хорошо соответствуют наблюдаемым проявлениям тектоники литосферных плит на Земле (Schubert et al., 2014).

*Эволюция плавающих континентов.* Основы тектоники плавающих континентов были разработаны в ИФЗ РАН в 2000-х годах. Для описания взаимодействия конвективных течений и континентов и выявления закономерностей их дрейфа решалась взаимосвязанная система уравнений конвекции в жидкости и уравнений движения твердых тел Эйлера.

Понять физические процессы, проявляющиеся при взаимодействии конвективных течений с плавающими континентами, можно с помощью численного эксперимента, выполненного автором в 2005 г. Был рассмотрен слой вязкой нагреваемой жидкости, на который помещены две легкие твердые пластины. В жидкости воз-

никает тепловая конвекция с несколькими конвективными ячейками; конвективные течения приводят в движение пластины. Поскольку пластины “тормозят” выход тепла из мантии, то они изменяют распределение температуры в мантии и вызывают перестройку во всей структуре мантийных течений. Результаты этого численного эксперимента, выполненного на простейшей модели, подтверждают и иллюстрируют открытые А. Вегенером (и затем развитые Т. Вильсоном) закономерности дрейфа континентов и выявляют ряд их новых закономерностей.

Для моделирования будущего дрейфа континентов автором в 2008 г. была рассмотрена сферическая модель конвекции, максимально приближенная по параметрам к современной мантии Земли. Сейсмическая томография позволяет получить пространственное распределение скоростей сейсмических волн в мантии. Известно, как эти скорости зависят от температуры. В результате пересчета было найдено пространственное распределение температуры в недрах современной Земли. Такое распределение температуры было определено начальным состоянием. Таким образом, рассчитывалась не абстрактная модель конвекции, а



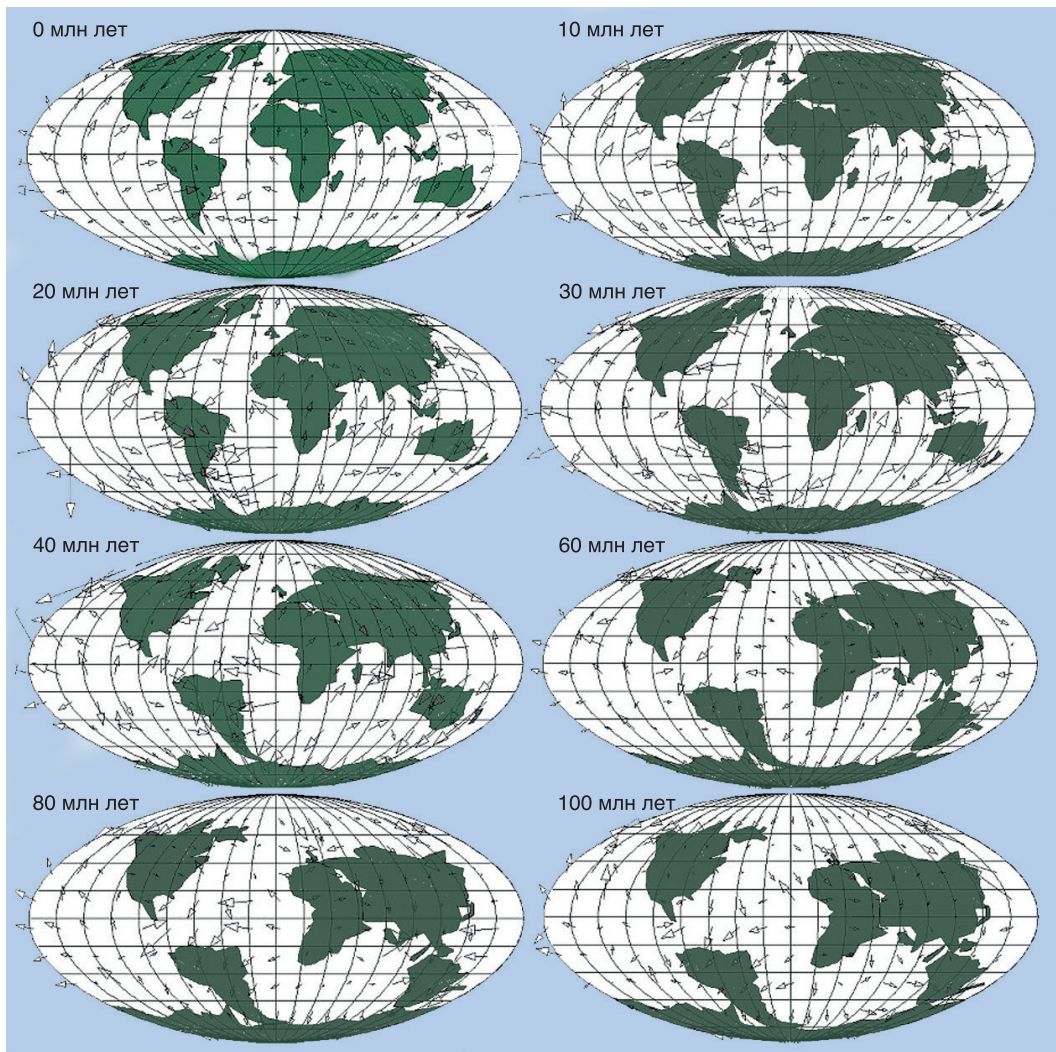
Модель эволюции конвекции с двумя плавающими континентами (расчет автора). Показано положение континентов и температура в мантии в последовательные моменты времени, в млн лет. Красной линией очерчен рассчитанный относительный тепловой поток  $Nu$ , зеленой линией – рельеф  $h$ , в км. Пластины (континенты) сначала объединяются над нисходящим конвективным потоком. Благодаря теплоэкранированию мантия под возникшим суперконтинентом прогревается, суперконтинент поднимается и разрывается. Весь цикл занимает примерно 0,5 млрд лет.

соответствующая современному состоянию Земли. Затем на жидкость наложено шесть теплопроводных жестких плавающих пластин, соответствующих по форме современным континентам, и восемь меньших пластин, соответствующих по тому же параметру большим островам. Далее решалась система уравнений тепловой конвекции совместно с системой урав-

нений Эйлера для перемещения и вращения континентов под действием сил вязкого сцепления с мантийными течениями, с учетом обратного теплового и механического влияния континентов на конвекцию.

Расчеты показали, как холодные области мантии стали опускаться, а горячие – подниматься и как в мантии возникла тепловая конвекция.

Благодаря механическому сцеплению конвективные течения привели в движение все континенты и острова. Однако благодаря тепловому взаимодействию континенты непрерывно влияют на поле температуры в мантии. Поскольку модель построена с учетом всех механических и тепловых взаимодействий вязкой мантии и твердых континентов (и при этом – для



*Расположение континентов в будущем (расчет автора), время исчисляется в млн лет; максимальная длина стрелки соответствует скорости 12 см в год. Контуром показаны рассчитанные положения континентов и островов, а стрелками – скорость мантийных течений в последовательные промежутки времени в будущем, на 100 млн лет вперед. Согласно модели, Южная Америка будет двигаться к Антарктиде, а Евразия, Австралия и Африка объединятся в суперконтинент.*

параметров вещества, соответствующего современному состоянию Земли), то она позволила рассчитать будущий дрейф континентов.

Численные модели, рассчитанные в ИФЗ РАН, показывают эволюцию ман-

тийной конвекции со всеми шестью плавающими континентами и крупными островами, форма которых соответствует данным наблюдений для современной Земли. В последнее время подобные

модели конвекции стали рассчитываться также за рубежом. Однако в этих моделях пока учитываются только четыре континента, при этом они упрощенно представляются в виде квадратов.

*Мантийные плюмы.* Представления о мантийных плюмах были введены в 1971 г. Дж. Морганом для объяснения происхождения цепочек вулканических островов типа Гавайской. Предположили, что в мантии Земли существуют горячие узкие вертикальные долговременные струи-плюмы, которые “прожигают” движущиеся плиты непосредственно над плюмом. В мировой научной литературе о природе плюмов долгое время шли дискуссии: высказывались предположения о том, что плюмы зарождаются только благодаря химическим примесям легкого вещества и поднимаются в мантии, не завися от конвективных течений. Однако в последнее время было установлено определенно, что плюмы представляют собой обычные восходящие конвективные потоки, которые возникают при высокой интенсивности тепловой конвекции и при подъеме приобретают грибовидную форму с “головкой” и “ножкой”. Также выяснилось, что содержащиеся в плюмах химические примеси не ускоряют, а, наоборот, тормозят плюмы. Погружающиеся плиты и поднимающиеся мантийные плюмы приводят в циркуляционное движение все вещество мантии, при этом плиты и плюмы сложным образом взаимодействуют между собой.

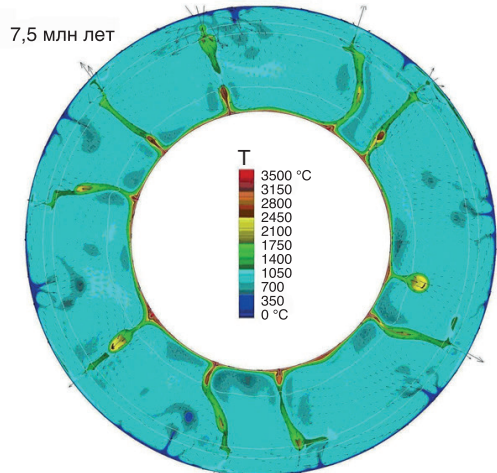
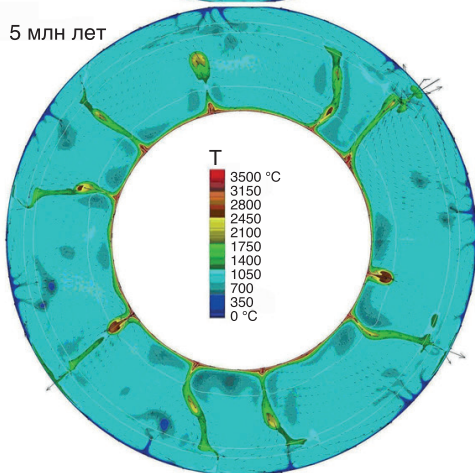
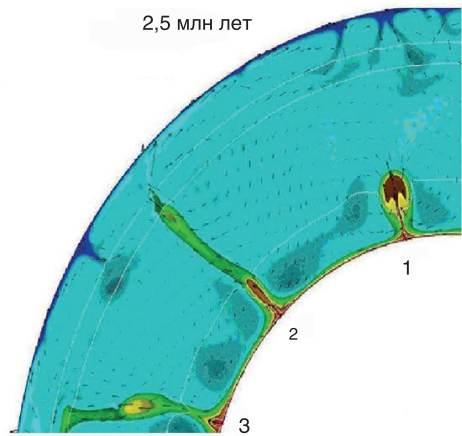
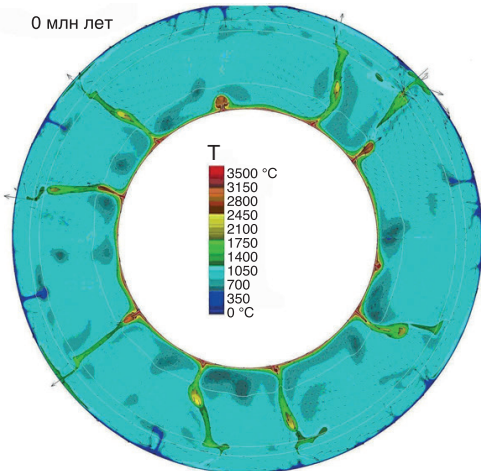
Наибольшее извержение вулкана возникает при прорыве через литосферу на поверхность Земли “головки” плюма. После застывания магмы образуется большая магматическая провинция. На суше ее называют траппом, на дне океана – базальтовым плато. Наибольшие на Земле – сибирские траппы – образовались 250 млн лет назад в результате постоянного извержения вулкана в течение нескольких лет. Существует гипотеза о том, что именно эта катастрофа привела к вымиранию первичных пресмыкающихся, освободив место для распространения динозавров на Земле. При этом, в отсутствие межвидовой борьбы, преимущество получили гигантские особи.

Другое грандиозное извержение вулкана, вызванное выходом на поверхность “головки” мантийного плюма, было 67 млн лет назад в Индии, в результате образовались Деканские траппы (крупная магматическая провинция, расположенная на плоскогорье Декан в западной и центральной частях Индии, это одно из крупнейших вулканических образований на Земле). Возможно, что это извержение погубило большую часть динозавров. Несколько позднее, после начала этого извержения, на Землю упал мексиканский астероид, который мог

“добить” динозавров. Однако все эти события, возможно, лишь “сдвинули” процесс во времени, поскольку биологическая эволюция всегда сопровождается вымиранием и рождением новых видов.

После прохождения “головки” плюма за ним остается и постоянно действует в течение до 200 млн лет “ножка” плюма. Она создает цепочку вулканов на движущей литосферной плите. Современное место выхода горячего вещества плюма на поверхность литосферной плиты называют горячей точкой. На приведенной в начале статьи карте рельефа Земли “горячие точки” были показаны красными кружками; в частности, на ней можно видеть Гавайскую “горячую точку” и вулканическую цепочку ранее образованных островов. По направлению движения этой цепочки, учитывая возраст островов, можно рассчитать скорость движения плит. В частности, на географических картах рельефа видно, что Тихоокеанская плита ранее двигалась на север, а 65 млн лет изменила свое направление на северо-восточное.

В 2016 г. в ИФЗ РАН были построены численные сферические модели интенсивной тепловой конвекции в вязкой жидкости с параметрами, соответствующими веществу современной мантии.



*Модель эволюции интенсивной тепловой конвекции в мантии (расчет автора с сотрудниками). Показана температура в мантии и поднимающиеся плюмы в последовательные моменты времени с интервалом в 2,5 млн лет. При высокой интенсивности восходящие потоки становятся нестационарными; они отмирают и вновь зарождаются. Справа вверху в большем масштабе показано, что плюм (1) при подъеме имеет головку и ножку; у плюмов (2) и (3) “головки” уже достигли поверхности и остались только пульсирующие “ножки”, внутри которых горячее вещество поднимется вверх порциями.*

Эти модели показывают не только, как зарождаются плюмы, но и как они “поднимаются” и почему заканчивают эволюцию. Новым стало обнаружение явления пульсации плюмов, при котором го-

рячее вещество в “ножке” плюма может подниматься не непрерывно, а порциями. При этом оказалось, что рассчитанное время подъема “головки” плюма (15 млн лет) и время между последующими

подъемами порций горячего вещества в “ножке” плюма в течение 10 млн лет согласуются с периодами между извержениями вулканов в горячих точках Земли (Schubert et al., 2014).

Ранее Земля была более горячей. Она остывает со скоростью примерно на 50 К за млрд лет. Поскольку вязкость вещества мантии значительно зависит от температуры, то интенсивность тепловой конвекции ранее была еще выше. Рассчитанные в ИФЗ РАН модели мантийной конвекции показывают, что в более ранней Земле “ножки” плюмов разрывались и вместо плюма поднимался конвейер “головок” плюмов, называемых “термиками”. Плюмовый режим тепловой конвекции фактически является переходным от стационарной конвекции к турбулентной. Представленная численная модель может служить доказательством того, что мантийные плюмы всегда возникают при интенсивной тепловой конвекции.

К настоящему времени теория глобальной тектоники Земли в основном выстроена; при ее создании использовались данные наблюдений геофизи-

ки, геохимии и геологии, а также данные лабораторных измерений вещества. Поэтому, в частности, стало понятно, почему в мантии при температуре ниже солидуса возможна конвекция; почему холодные каменные плиты толщиной 50 км могут изгибаться при погружении в мантию и при этом не ломаться. Оказалось, что это обусловлено большой длительностью процессов, при которых диффузия успевает эффективно “придавать” твердым телам вязкие свойства.

На пути создания теории тектоники Земли были периоды выдвижения гипотез, некоторые из которых оказались ошибочными. Так, долгое время полагали, что конвекция в мантии может быть двухслойной или перемежающейся (попеременно расслоенная и общемантийная), а плюмы могут подниматься независимо от тепловой конвекции благодаря присутствию в них легких химических примесей. Эти гипотезы вы-

двигались при построении структуры мантийных течений для объяснения причины различия в химическом составе магм срединно-океанических хребтов и горячих точек. Предполагалось, что эти магмы поступают, соответственно, или из верхней, или из нижней мантии. Однако в настоящее время твердо установлено, что главной движущей силой проявлений тектоники Земли является общемантийная тепловая конвекция. Погружающиеся холодные высоковязкие плиты, а также поднимающиеся горячие узкие плюмы приводят в циркуляционное движение все вещество мантии, взаимодействуя между собой.

Более подробно модели, воспроизводящие различные этапы эволюции Земли, и тектонические процессы изложены в приведенных в ссылке статьях<sup>1</sup>. Процессы зарождения, подъема и отмирания плюмов можно детально посмотреть также в виде фильма на сайте: <http://rjes.wdcb.ru/v16/2016ES000569/plumes-hr.html>.

---

<sup>1</sup> Трубицын В.П. Основы тектоники плавающих континентов // Физика Земли, 2000. № 9. С. 3–40.

Трубицын В.П. Тектоника плавающих континентов // Вестник РАН, 2005. № 1. С. 10–21.

Трубицын В.П. Сейсмическая томография и дрейф континентов // Физика Земли, 2008. № 11. С. 3–19.

Трубицын В.П. Реология мантии и тектоника океанических литосферных плит // Физика Земли, 2012. № 6. С. 3–22.

Trubitsyn V. P., Evseev M. N. Pulsation of mantle plumes // Russian Journal of Earth Science, 2016. V. 16 (ES3005, doi:10.2205/2016ES000569).

Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle convection in the Earth and Planets. Cambridge: University Press, 2004.



## Тайны планетных недр

Т.В. ГУДКОВА,  
доктор физико-математических наук  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Одна из центральных проблем наук о Земле – геофизики, геохимии и геологии – построение теории образования Земли, ее начального состояния и эволюции. Начиная с Р. Декарта (начало XVII в.), вопрос о происхождении и эволюции Солнечной системы привлекал к себе внимание крупнейших естествоиспытателей. Научная космогония ведет свое начало с работ И. Канта и П.-С. Лапласа (Земля и Вселенная, 2009, № 2). Большой вклад в теорию образования планет внес



академик О.Ю. Шмидт (Земля и Вселенная, 2002, № 2). Проблемы изучения внутреннего строения Земли, Луны и планет, их эво-

люции тесно взаимосвязаны (Земля и Вселенная, 1973, № 5; 1974, № 1; 1992, № 4). С одной стороны, исследование процессов, происходящих (и происходивших) на Земле невозможно рассматривать без привлечения данных о планетах и спутниках. С другой – при изучении планет наши исследования опираются на знания, полученные для Земли. Внутреннее строение нашей планеты служит отправной точкой при исследовании недр других планет.

### СОСТАВ ПЛАНЕТ

По физическим свойствам планеты делятся на две группы: планеты земной группы – Меркурий, Венера, Земля, Марс и планеты-гиганты – Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун (в

порядке их удаления от Солнца), которые разделены поясом астероидов, – тысячами малых планет (поперечником 1–100 км), многие из них – глыбы неправильной формы (Земля и Вселенная, 1985, № 3; 2008, № 6). Важное значение ас-

тероидов – в том, что из них, по-видимому, образуются метеориты, похожие на состав Земли и планет.

Планеты земной группы состоят, в основном, из силикатов и железа, а планеты-гиганты – из водорода и гелия с примесью

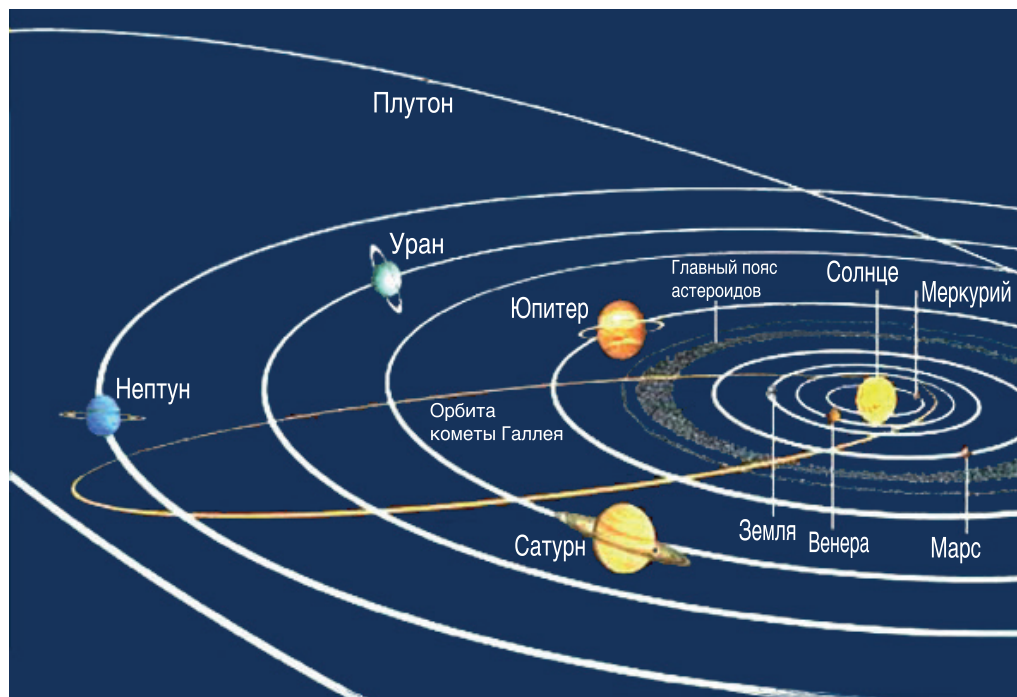


Схема расположения планет Солнечной системы.

воды, метана и аммиака. Различие плотностей планет связано с возрастанием температуры в туманности по направлению к Солнцу. В результате этого вблизи Солнца в виде твердых частиц могли существовать только наименее летучие элементы, а эти элементы имеют высокую плотность. Последняя стадия роста планет земной группы отличалась от стадии формирования планет-гигантов. Дело в том, что летучие соединения водорода и сами водород и гелий, а также некоторые инертные газы не смогли быть “захваченными” растущими протопла-

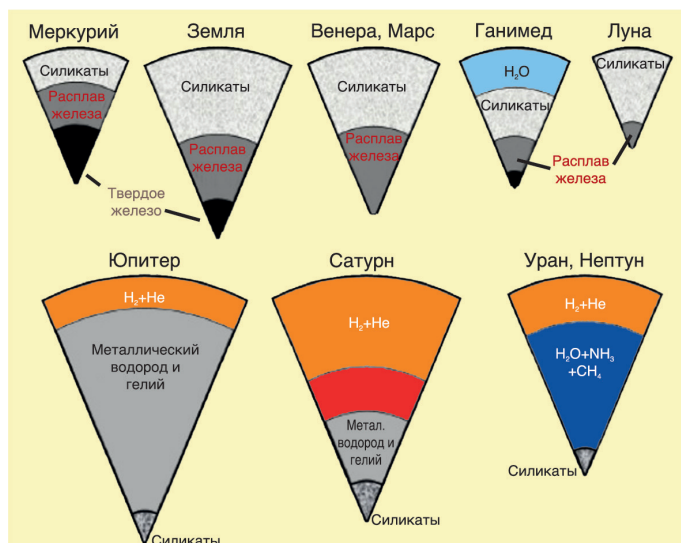
нетными телами в земной зоне из-за сравнительно больших температур. Поэтому эти планеты “вычерпали” в своих зонах лишь каменистые и железистые вещества, а их малые размеры не позволяли им “удержать” водород и гелий.

Наоборот, протопланеты группы Юпитера из-за более низких температур быстро росли за счет ледяной компоненты летучих соединений, что позволило им не только “удержать” водородно-гелиевую компоненту, но и вобрать в себя большую массу этого газа из своей области (Земля и Вселенная, 1982, № 3). У Юпитера ос-

нова – газовая компонента (водород, гелий, Ne, N<sub>2</sub>, CO) – составляет 78–82%, на втором месте – ледяная (H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>; 14–17%), на третьем – силикатная (железо, никель, сульфиды железа, а также SiO<sub>2</sub>, MgO, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, которые вместе с Fe и Ni образовали различные силикаты и алюмосиликаты) – 1–5% (Земля и Вселенная, 1977, № 3). У Сатурна газовая компонента сокращается до 70%, ледяная – доходит до 23% (Земля и Вселенная, 1972, № 1; 1982, № 4). У Урана и Нептуна увеличение ледяной компоненты доходит до 70%, на втором месте – сили-



Внутреннее строение Луны и планет, а также спутника Юпитера Ганимеда. Наиболее существенным различием между планетами является средний состав (соотношение между газовой, ледовой и силикатной компонентами). "Из работы Жаркова В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. – М., Наука и образование, 2013".



катная (около 20%; Земля и Вселенная, 1991, № 2, 3).

Вопреки Жюль Верну (научно-фантастический роман "Путешествие к центру Земли", 1864 г.), проникнуть в глубокие недра Земли еще никому не удалось. Непосредственное проникновение в глубокие недра планет (так же, как и в недра Земли) невозможно. Самые глубокие скважины, пробуренные на Земле, позволили заглянуть лишь на глубину немногим более 12 км (Кольская сверхглубокая скважина, Россия; Земля и Вселенная, 1986, № 1). Что же говорить о других планетах, недра которых вообще малодоступны для прямых исследований?

О Земле нам известно намного больше, чем о других планетах. Источником наиболее детальной информации о недрах Земли служит сейсмология. При медицинских обследованиях рентгеновские лучи проходят "сквозь" человеческое тело, и на снимке возникает рисунок из черных и белых тонов,

которую глаз специалиста способен воспринять как структуру тела. Во многом сходная картина наблюдается и при землетрясениях (планетотрясениях), когда из ограниченной области под поверхностью планеты излучаются упругие колебания – сейсмические волны. Сейсмические волны проходят сквозь Землю и регистрируются сейсмостанциями на поверхности. Они содержат информацию о среде, через которую прошли; главная задача – расшифровать записанные волны. Дальнейший анализ полученной информации позволяет определить профили плотности и упругих модулей: сжатия и сдвига в недрах планеты. Сравнительно определенную зависимость плотности от давления с уравнениями состояния различных горных пород и минералов,

найденных в лабораторных экспериментах (диапазон давлений и температур в Земле – 3,5 Мбар и 6000°С), мы получаем возможность приступить к подбору конкретного вещественного состава земных недр на количественной основе. Вещество в недрах Земли, исключая ее внешнее жидкое ядро, состоит из смеси поликристаллов различных минералов. Реализовать известный средний химический состав можно различными вариантами минеральных ансамблей и химических соединений. Неоднозначность подбора пропорций представляет одну из основных трудностей проблемы.

С физико-химической точки зрения Земля разделяется на две части: силикатную оболочку (или мантию) и металлическое ядро. Земная кора имеет

вторичное происхождение: она “выделилась” из оболочки при тепловой эволюции за счет гравитационной дифференциации. Под континентами земная кора простирается до глубины около 40 км, представляя собой тонкий наружный слой. Континентальная кора сложена легким веществом: главным образом гранитом. Давление в нижней части коры достигает примерно 10 кбар, а температура – 700–800°С. Мантия располагается от подошвы коры до глубины 2900 км

и занимает около 80% всего объема Земли. При первом приближении можно считать, что химический состав мантии не зависит от ее глубины, где главным компонентом является перидотит, состоящий из равных молекулярных долей оливина (90%  $Mg_2SiO_4$ ) и 10% ( $Fe_2SiO_4$ ) и алюминиевого пироксена 81% ( $Mg_2SiO_3$ ), 9% ( $Fe_2SiO_3$ ), 10% ( $Al_2O_3$ ). Силикатная мантия – твердая, но в геологических масштабах времени ведет себя как вязкая жидкость. Минералы мантии испытывают фазовые

переходы, в результате которых происходит скачкообразное изменение ее плотности; и эти границы также были подтверждены сейсмическими данными. Внешнее ядро – жидкое, оно состоит из железа с добавлением легких веществ – таких, как кремний, сера и кислород. Внутреннее ядро – твердое, в основном, содержит железоникелевый сплав.

#### ДИНАМИЧНАЯ ЗЕМЛЯ

Землетрясения, извержения вулканов и изменения уровня моря свидетельствуют о том, что Земля не только изменялась в прошлом, но и теперь остается динамичной планетой. Все эти явления обусловлены процессами, происходящими глубоко в Земле.

Температура и давление являются важнейшими параметрами земных недр, они определяют состояние вещества. С глубиной температура увеличивается приблизительно на 10–30 К/км. Известно, что температура плавления растет с повышением давления, возрастающего с глубиной. Температура плавления силикатов при атмосферном давлении составляет порядка 1100–1200°С и ее рост составляет в среднем на 3 К/км. Легко оценить глубину, на которой температура пород приближается к температуре плавления (за температуру плавления часто

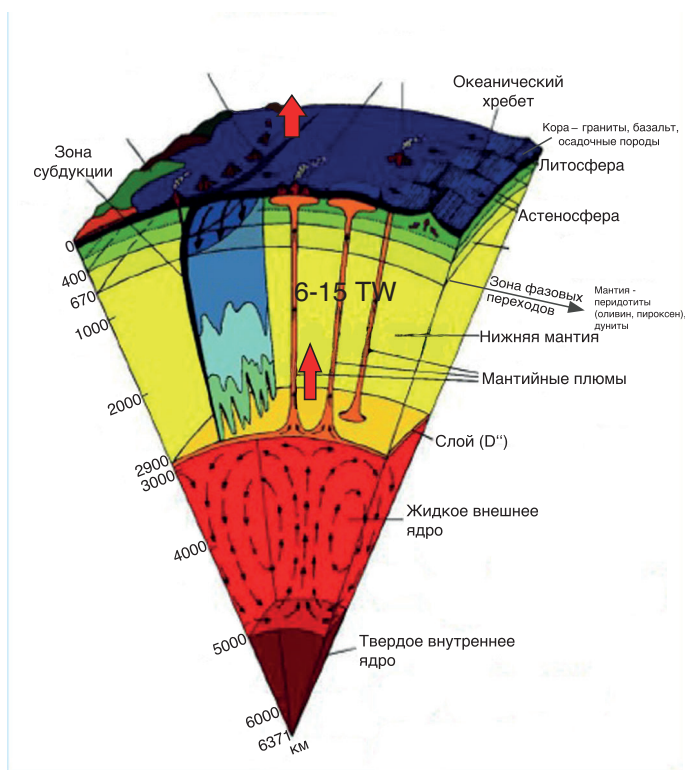
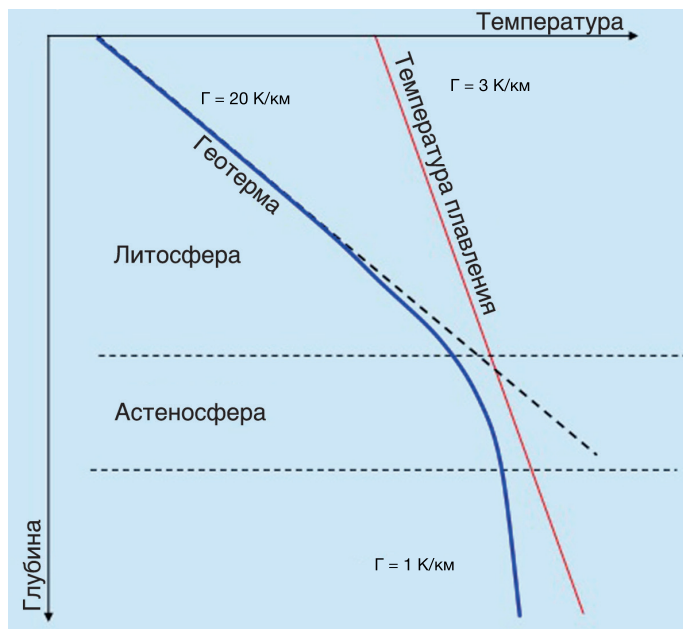


Схема внутреннего строения Земли.

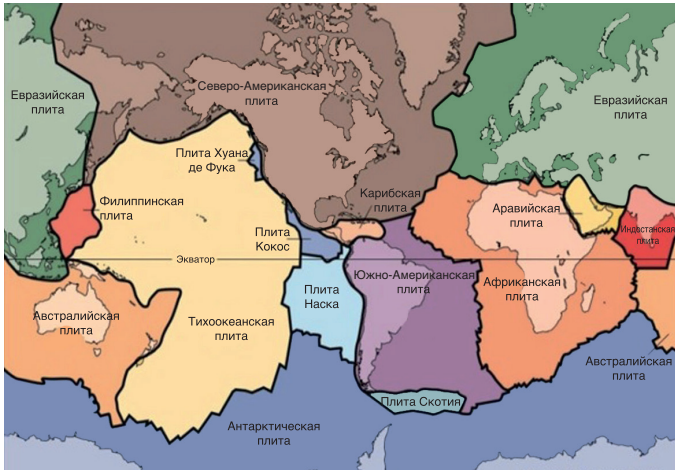
График изменения температуры пород. Температура пород астеносферы близка к температуре солидуса. Часть легкоплавких минералов (единицы процентов) находится в расплавленном состоянии. Голубая линия – изменение температуры пород с глубиной погружения, красная – изменение температуры плавления пород с глубиной погружения. По данным автора.

принимают температуру солидуса, то есть температуру наиболее легкоплавкого минерала в смеси), – 70–160 км. Ниже этого уровня порода должна бы находиться в расплавленном (точнее – в пластичном) состоянии. Согласно сейсмическим данным на глубине от 100 до 300 км происходит снижение скорости распространения сейсмических волн и увеличивается скорость их затухания, что интерпретируется как частичное (3–7%) плавление горных пород; полного плавления пород не наблюдается. Более того, на больших глубинах нет и частичного плавления. Температура пород на глубине более 300–500 км увеличивается со скоростью порядка 1 К/км и разница между температурой породы и температурой плавления возрастает. Поскольку вязкость зависит от того, насколько температура породы близка к температуре плавления,



то можно выделить интервал глубин, где вязкость породы минимальна. Этот наиболее пластичный слой называется астеносферой. В геологическом масштабе времени (миллионы лет) породы астеносферы ведут себя как вязкая жидкость. Свойства астеносферы связаны с тем, что температура слагающих ее пород близка к температуре солидуса и некоторая часть легкоплавких минералов (единицы процентов) находится в расплавленном состоянии. Выше лежащие холодные твердые породы называются литосферой. Она обладает свойствами твердого хрупкого тела даже в геологических процессах, продолжающихся сотни миллионов лет.

В конце 1960-х гг. была сформулирована теория тектоники плит (Земля и Вселенная, 1974, № 5; 1980, № 6). Согласно ей, поверхность Земли подвижна, она разделена примерно на 20 отдельных твердых (литосферных) плит, которые «плавают» в более плотном, но пластичном мантийном веществе. Плиты двигаются с различной скоростью – от 2 до 20 см в год. К крупным литосферным плитам принадлежат Тихоокеанская (самая большая по размерам), Северо-Американская, Южно-Американская, Африканская, Евразийская, Индийская (или Индо-Австралийская), Антарктическая и Наска (самая маленькая). Иногда к крупным плитам относят Аравийскую плиту, к средним – Филиппинскую,



Карта расположения литосферных плит на Земле,двигающихся со скоростью 2–20 см/год. Горизонтальные размеры плит составляют порядка 1000 км. Характерное время существования плиты – (10–100 млн лет) мало по сравнению с возрастом Земли (4,5 млрд лет).

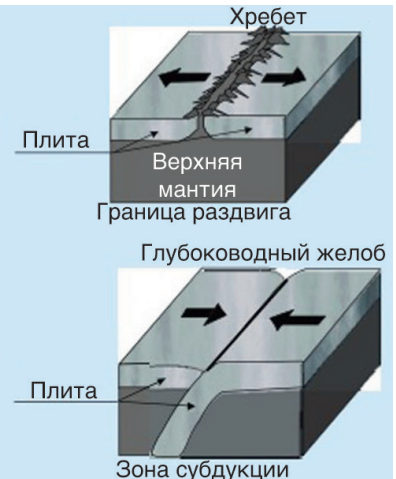
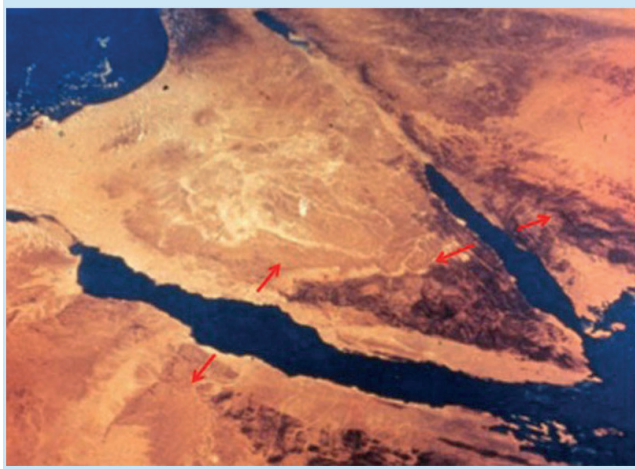
Скоттия и Карибскую. По площади с ними соизмеримы плиты Кокос и Аравийская; кроме этого, существует и ряд малых плит (см. статью В.И. Шевченко и А.А. Лукка в этом номере журнала).

Все виды тектонической активности совпадают, глав-

ным образом, с границами плит, где можно наблюдать их относительное движение. Характер таких явлений, как землетрясения, вулканизм, горообразование зависит от того, сходятся плиты или расходятся и от того, какие участки плит граничат меж-

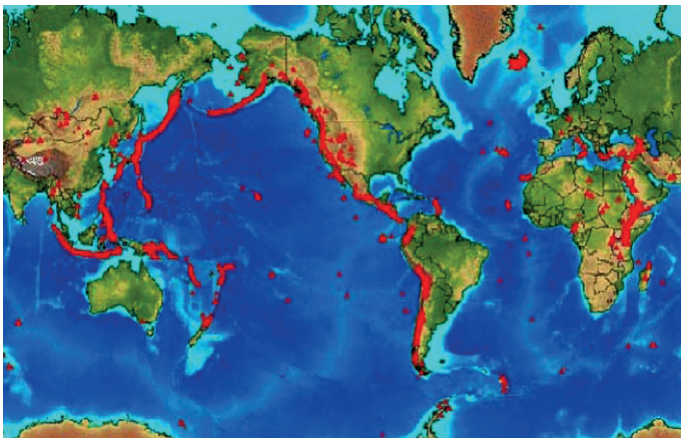
ду собой, – континентальные или океанические.

При раздвижении литосферных плит между ними возникает трещина разрыва, куда внедряется расплавленное мантийное вещество. Поднимающееся вещество охлаждается, кристаллизуется; начинается образование океанических литосферных плит, которые являются дном океана. Это явление носит название спрединг. К наиболее характерным сре-



Рифты Красного моря и залива Акабы, где происходит спрединг, – раздвижение литосферных плит. Справа – схемы движения плит. По данным сайта: [https://en.wikipedia.org/wiki/Great\\_Rift\\_Valley](https://en.wikipedia.org/wiki/Great_Rift_Valley).

Карта основных эпицентров землетрясений. Их очаги связаны в основном с зонами субдукции. "Из работы Жаркова В.Н. Внутреннее строение Земли и планеты. – М.: Наука и образование, 2013"



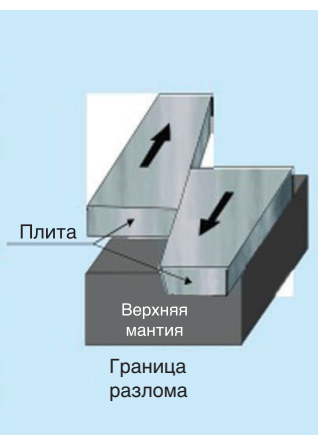
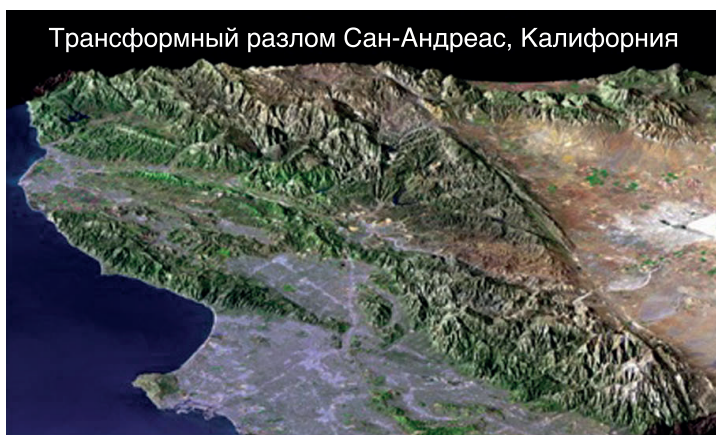
динно-океаническим возвышенностям относится Срединно-Атлантический хребет. В настоящее время в науках о Земле распространена точка зрения о том, что 200 млн лет назад Атлантического океана не было, а суша Земли представляла собой единый материк – Пангею, которая потом раскололась вдоль этого хребта (Земля и Вселенная, 1974, № 5; 1994, № 3).

Океанические плиты, двигаясь, достигают континентальных литосферных плит, сталкиваются друг с дру-

гом, край океанической плиты опускается в мантию, опускаясь под край континентальной плиты. В результате мантия поглощает материал опускающейся (поддвигающейся) плиты и вдоль границ таких плит образуются глубоководные желоба. Эта зона называется зоной субдукции.

Если посмотреть на карту Тихого океана, то мы увидим, что островные дуги, окаймляющие Азиатский материк с востока, прилегают к глубоководным желобам. Это зоны максимальной сейсмической активности, где Тихоокеанская плита погружается под материковую Евразийскую плиту. Очаги

Трансформный разлом Сан-Андреас, Калифорния



Трансформный разлом Сан-Андреас в Калифорнии (США). Направление движения плит (справа) противоположны друг относительно друга, что приводит к разлому. По данным геологической службы США.

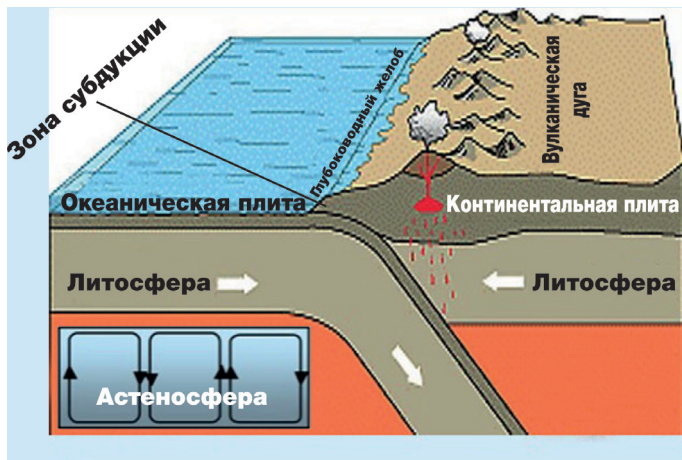


Схема движения литосферных плит. Его причинами являются астеносферные течения (конвективные потоки), имеющие определенный характер – они распадаются на устойчивые замкнутые области (ячейки Бенара). В соседних ячейках жидкость движется в одну сторону. В то время, когда вещество движется горизонтально вблизи нижней поверхности, – оно нагревается; затем горячее вещество поднимается вверх, отдает свою энергию холодной поверхности и опускается вниз. Блок-схема составлена по данным: <http://ru.wikipedia.org/>; ячейки Бенара добавлены автором.

глубоких и средней глубины землетрясений в этом регионе в основном связаны с зоной субдукции. Размер Тихоокеанской плиты постоянно уменьшается.

Существуют плиты, продвигающиеся друг относительно друга в горизонтальной плоскости, но направления их движения противоположны; такая граница называется разломом. Они также являются постоянными источниками сейсмической активности. Наиболее характерный пример такого движения плит – трансформный разлом Сан-Андреас (США), располагающийся между Тихоокеанской и Североамериканской плитами длиной 1300 км, проходящий вдоль побережья по территории штата Калифорния.

При движении двух континентальных плит, приблизительно равных по мощности, навстречу друг другу, происходит поддвиг (или надвиг) и возникают

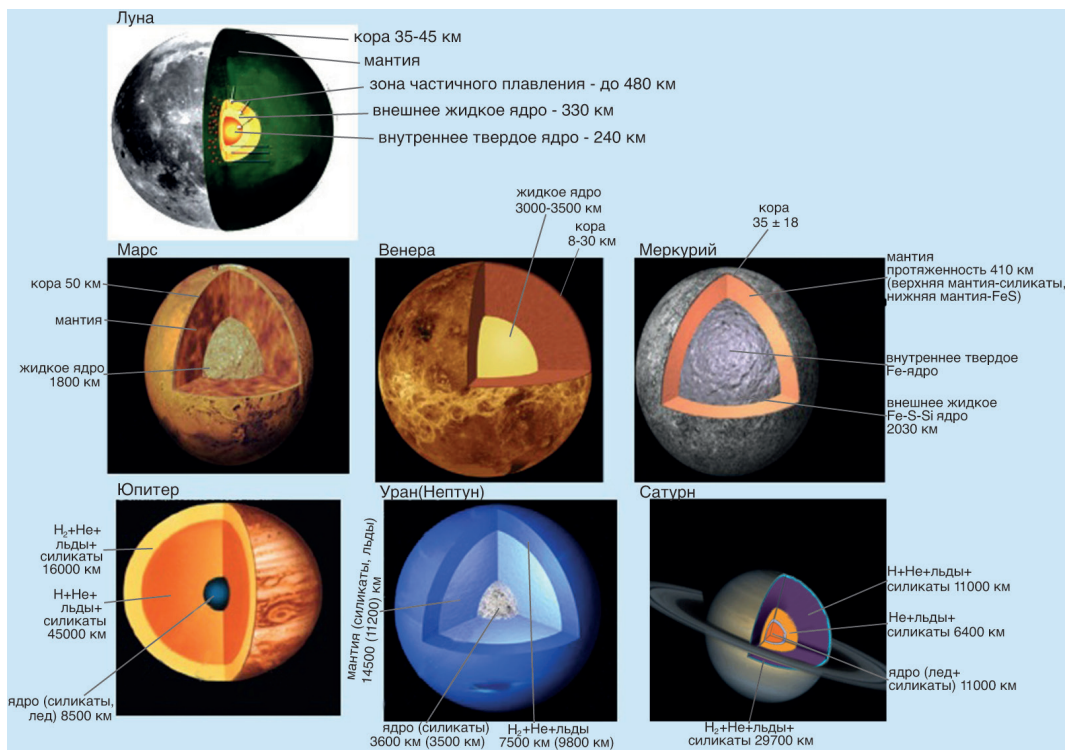
мощные горные системы – такие, как Альпы и Гималаи.

ПОЧЕМУ ЗЕМЛЯ ДИНАМИЧНА?

Теперь остановимся на причинах, вызывающих движение литосферных плит. Определяющее воздействие на взаимодействие литосферных плит оказывают конвективные потоки мантийного вещества. В настоящее время считается, что литосфера представляет собой тонкую сферическую оболочку, лежащую на охваченной конвективными течениями астеносфере. Под влиянием астеносферных течений возникают подвижки и взаимные перемещения литосферных плит относительно друг друга. Конвективные процессы вызывают астеносферные течения, происходящие в мантии. Над восходящими потоками вещества в мантии образуются расходящиеся

астеносферные течения, в зонах которых литосферные плиты будут расходиться в стороны и между ними могут возникать рифтовые зоны. Над нисходящими потоками вещества мантии появятся сходящиеся астеносферные течения, что, в свою очередь, вызывает наползание одной литосферной плиты на другую и их деформацию. Конвективные ячейки в мантии (их расположение, величина и направление потоков) меняются во времени.

Процесс дрейфа континентов происходит и в настоящее время. Он выражается в увеличении площади растущих океанов (Атлантического и Индийского) и в уменьшении площади Тихого океана за счет дрейфа обоих американских материков на запад, а Евразии –



Схемы внутреннего строения Луны и планет Солнечной системы.

на восток. По направлению и скорости движения основных литосферных плит можно определить тенденции в изменении картины расположения океанов и материков на нашей планете.

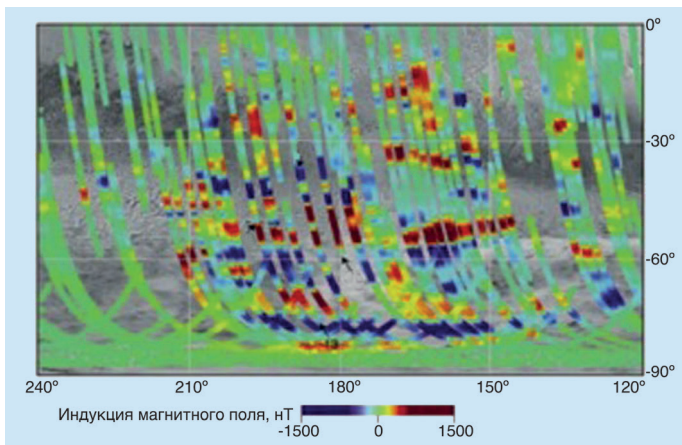
Подавляющая доля вулканической деятельности Земли возникает в результате активных тектонических процессов, происходящих на границах плит. Изолированные вулканы, не связанные с вулканизмом плитовых границ, получили название горячих точек (на Земле их 122),

они активны в последние 10 млн лет и представляют собой куполообразные возвышенности, из них во время извержения истекает лава. В океанах – это острова, цепочки островов или подводные горы и их цепи диаметром до 200 км. Так как тектонические плиты движутся, а плюмы остаются на тех же местах, то каждый вулкан со временем потухает; а новые формируются там, где плита проходит над “горячей точкой”. Возможно, Гавайские острова образовались в ре-

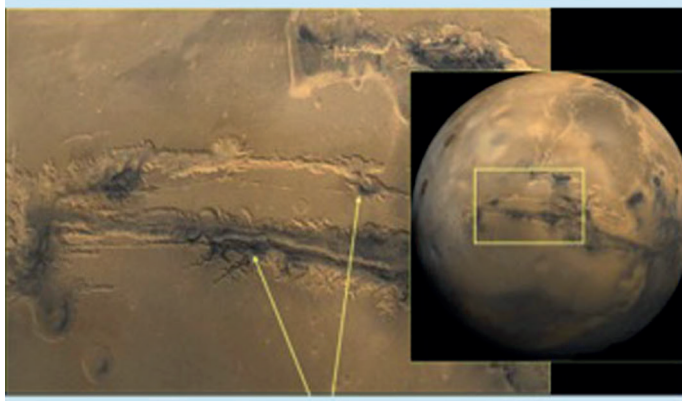
зультате проявления такой вулканической активности.

#### ЗАГАДКИ ПЛАНЕТНЫХ НЕДР

Наши знания о внутреннем строении других планет можно сравнить с представлением о внутреннем строении Земли, которым мы располагали до регистрации сейсмических волн и собственных колебаний, распространяющихся “в теле” планеты после землетрясения. Физика планет земной группы и твердых спутников



Карта магнитных аномалий на поверхности Марса. Их "полосатость", а также наличие огромного рифтового каньона указывает на возможность тектоники плит в начальный период формирования Марса, (по данным АМС "MAVEN"). Справа – фрагмент участка одного из районов Марса Долины Маринера; стрелками показаны рифтовые зоны. Рисунок и фото NASA.



го на Землю с помощью межпланетных станций; измерение профиля внутренней электропроводности Луны по "отклику" на внешние электромагнитные возмущения (это позволило определить профиль температуры в ее недрах). В результате анализа возмущений, исходящих от космического аппарата, обращающегося вокруг Луны, и регистрации ее собственных движений с помощью лазерного измерения расстояния до угловых отражателей, установленных на ее поверхности ("Аполлон-11", "Луноход-1" и "Луноход-2"); были проведены детальные измерения ее гравитационного поля (Земля и Вселенная, 1971, № 3; 1973, № 3; 1989, № 5).

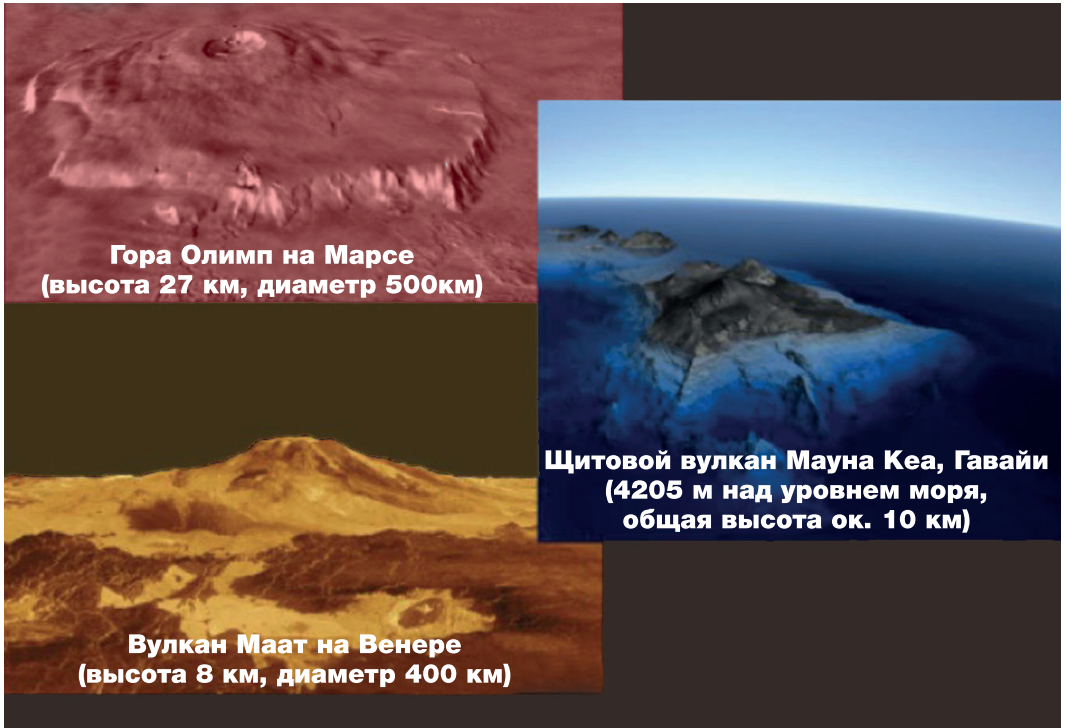
В Солнечной системе Луна является единственным космическим телом (кроме Земли), для которого были получены сейсмические данные. С 19 ноября 1969 г. до сентября 1977 г. выполнены измерения лунотрясений сейсмометра-

планет-гигантов мало чем отличается от физики Земли (так же, как и методы их исследования). Разница заключается в том, что эти исследования не всегда доступны из-за удаленности планет, а в случае их реализации они – гораздо более дорогостоящие. Методы, применяемые для диагностики планетных недр, – это данные гравитационного поля, измерение теплового потока и магнитного поля; при этом принимаются во внимание геологические характеристики поверхности; они могут отражать

следы процессов, происходивших в недрах планеты в прошлом. Большая роль в получении уравнения состояния веществ, слагающих недра планет, отводится лабораторным данным по физике высоких давлений и температур.

При изучении Луны мы имеем возможность использовать ряд таких же геофизических методов, которые применяются для изучения внутреннего строения Земли. Анализ химического состава поверхности по образцам лунного грунта, доставленно-





*Сравнение образований, имеющих вулканическое происхождение на Земле (вершина вулкана Мауна Кеа, Гавайи), на Марсе (вулкан Олимп – 500 км в поперечнике, высота 27 км) и на Венере (вулкан Маат – диаметр 400 км, высота 8 км). Фото геологической службы США и NASA.*

ми, установленными в ходе полетов по программе “Аполлон” (Земля и Вселенная, 2009, № 5). Ученые до сих пор анализируют сейсмограммы, применяя новейшие методы обработки. Это позволило выделить отраженные от ядра Луны волны; и тем самым определить радиус ее внешнего жидкого ядра, а также обнаружить твердое внутреннее ядро Луны.

После Луны из планетных тел земной группы наибольшее число наблюдательных данных имеется о внутреннем строении

Марса (Земля и Вселенная, 1975, № 5). Построение моделей внутреннего строения планеты основывается на данных геохимического анализа, результатах изучения “поведения” материалов при высоких давлениях и температуре, а также на информации о гравитационном поле планеты. В соответствии с этими данными, кора Марса составляет 50–100 км; ядро Марса находится в жидком состоянии, а радиус равен половине радиуса планеты. В отличие от Земли,

планеты земной группы – одноплитовые планеты: на них нет следов тектоники плит. Однако “полосатость” магнитных аномалий на поверхности Марса указывает на возможность процесса тектоники плит в начальные этапы эволюции планеты (4 млрд лет назад). Особенностью Марса является наличие обширных сводовых поднятий – таких, как вулканическое нагорье Фарсида (протяженность 6000 км, высота 7 км). Огромный щитовой вулкан Олимп на этом плато размером

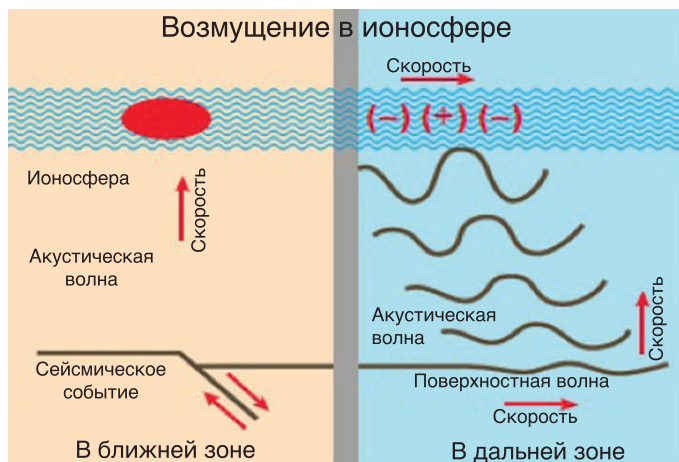


Схема механизма регистрации сейсмических событий в атмосфере. Мелкофокусные планетотрясения порождают волны сжатия, которые распространяются и в атмосфере, достигая ионосферных высот; при этом их амплитуда возрастает на несколько порядков непосредственно над очагом сейсмического события (на схеме слева). Поверхностные волны, возникающие при планетотрясении, вызывают поверхностные смещения – источники акустических волн в отдалении от сейсмического события (на схеме справа). По данным автора.

с Аризону возвышается над окружающим ландшафтом на 21 км. Для сравнения – самый крупный вулкан на Земле Мауна-Лоа (Гавайские острова) имеет диаметр 200 км и высоту 9 км. Геоморфологические характеристики огромного каньона Долина Маринера на Марсе и картина напряженного состояния под этой областью могут говорить о тектонических процессах.

Венера по своим механическим параметрам (радиус, средняя плотность) является планетой-близнецом Земли (Земля и Вселенная, 1966, № 2; 1980, № 4; 1986, № 4; 2012, № 3). В отличие от Земли, у нее нет собственного магнитного поля, это сухая планета – ее наиболее существенное отличие – молодой возраст горных пород на ее поверхности, которая носит яркие черты вулканической деятельности. На Венере отсутствуют следы

глобальной тектоники плит. Из-за высокой температуры (около 500°С) и давления (около 90 бар) на ее поверхности технические условия для сейсмических экспериментов на планете очень сложны – ни один из инструментов не сможет проработать более двух часов (например, работавшие ранее спускаемые аппараты советских АМС “Венера-9” – “Венера-14” и “Вега-1 и -2”). Альтернативой для Венеры может стать регистрация сигналов, связанных с сейсмической активностью, – в атмосфере.

Меркурий – наименьшая среди планет земной группы (Земля и Вселенная, 1976, № 1; 2016, № 4). У него нет атмосферы, толщина коры – 50 км, ядро составляет  $\frac{3}{4}$  радиуса планеты и окружено силикатной мантией 400 км. Меркурий обладает магнитным полем, которое, возможно, образуется по принципу

гидромагнитного динамо (как и на Земле), что является результатом циркуляции жидкого ядра планеты.

Все планеты Солнечной системы образовались в результате единого процесса из общего протопланетного облака. Выявление закономерностей в их формировании и развитии, отличительных особенностей условий образования и эволюции прольет свет на историю рождения Земли и ее последующую эволюцию. В настоящее время ведется завершающая фаза подготовки сейсмического эксперимента на Марсе. С этой целью 5 мая 2018 г. запущена АМС “InSight” (Interior exploration using Seismic investigations, geodesy and heat transport – исследование внутреннего строения с использова-

нием сейсмических исследований, данных геодезии и измерения теплового потока), созданная NASA в сотрудничестве с ESA (см. стр. 105 в этом номере журнала). На станции установлен трехкомпонентный широкополосный сейсмометр. Ожидается, что в ноябре 2018 г. он будет доставлен на поверхность Марса для работы там в течение двух лет. Прибор позволит записать полный спектр сейсмических сигналов – как от ожидаемых марсотря-

сений, вызванных охлаждением литосферы, так и в результате метеоритных ударов. Высокая чувствительность сейсмометра на низких частотах позволит регистрировать периоды собственных колебаний планеты и поверхностные волны, генерируемые атмосферными процессами. Спецификой проведения сейсмического эксперимента на Марсе является установка только одного сейсмометра; для этого разрабатываются методы получения максимально

возможной информации по данным одного прибора. Кроме сейсмического эксперимента, планируется бурение скважины глубиной до 5 м для измерения теплового потока из недр планеты. Сотрудники ИФЗ РАН входят в научную группу по подготовке сейсмического эксперимента.

Ученые с нетерпением ждут результатов новых сейсмических наблюдений на планетах; полученные результаты помогут нам лучше понять внутреннее устройство нашей планеты.

---

## Информация

---

### Рождение черной дыры

В 2015 г. астрономы обнаружили внезапное исчезновение звезды N6946-BH1, которая словно растворилась во Вселенной. Пропавшая звезда представляла собой красный сверхгигант массой  $25 M_{\odot}$ , находящийся в спиральной галактике, с перемычкой NGC 6946, в созвездии Лебедь (расстояние – 22 млн св. лет от нас). В 2009 г. звезда значительно увеличила свою активность, а затем исчезла из видимости; на

ее месте был выявлен лишь источник инфракрасного излучения. Возникла версия, что ИК-излучение может порождать материя, которая “падает” на черную дыру. Последние наблюдения (в 2017 г.) за объектом N6946-BH1 с использованием наземного телескопа LBT, космической обсерватории “Спитцер” и КТХ не выявили никаких следов исчезнувшего светила. По предположению ученых, можно говорить о “неудачном взрыве массивной звезды” – когда светило тихо “схлопывается” в черную дыру, без превращения в сверхновую. Коллапс вещества вызвал вспышку нейтрино, что уменьшило массу N6946-BH1 на некоторую до-

лю процента и обусловило ударную волну, которая “сорвала” оболочку звезды; это и повысило ее яркость. Если это событие действительно отражает образование черной дыры, то тогда это станет первым фактом наблюдения подобного процесса. Однако, уверенно говорить о таком механизме исчезновения звезды пока преждевременно. Дальнейшие наблюдения за объектом планируется начать с помощью космического рентгеновского телескопа “Чандра”.

*По материалам  
интернет-сайтов,  
13 июня 2018 г.*



## Автономное складко-надвигообразование в земной коре

В.И. ШЕВЧЕНКО,  
кандидат геолого-минералогических наук

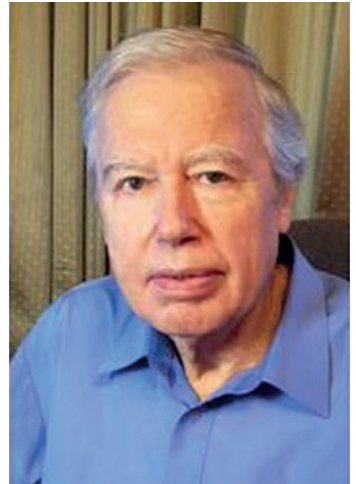
А.А. ЛУКК,  
кандидат физико-математических наук  
Институт физики Земли РАН

---



Земная кора разделяется на обширные стабильные плиты, платформы, в пределах которых горные породы слабо или совсем не деформированы, и узкие подвижные пояса, для которых характерна интенсивная дислоцированность пород. Примером такого подвиж-

ного пояса является горный пояс Альп, Карпат, Кавказа, Памира, Гималаев. В статье рассмотрены геодинамика подвижных поясов Земли и механизм формирования тектонических дислокаций (складок, разломов) пород земной коры, то есть нарушения залегания горных пород под действием тектонических процессов. Принято считать, что деформирование пород подвижных поясов вызвано давлением более прочных платформ, плит на менее прочные, пластичные подвижные пояса, то есть с внешним воздействием на них. Полученные в течение последнего полувекка геологические, сейсмологические и геодезические данные позволяют нам утверждать, что важнейшим фактором деформирования



пород земной коры является увеличение объема слоистых осадочных и других пород, не связанное с механическим внешним воздействием на них. Это позволяет говорить об автономности процесса формирования складчато-разломной структуры подвижных поясов.

## ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМАХ ТЕКТОГЕНЕЗА

Породы осадочного и вулканического происхождения в земной коре во время своего образования и на платформах, и в подвижных поясах представляют пакеты преимущественно пологозалегающих пластов. Но потом в составе подвижных поясов они оказываются смятыми в складки, рассечены различными разрывами. Среди различных проблем, которые возникают перед исследователями на всем протяжении существования наук о Земле – вопрос о механизме (или механизмах) формирования таких складчато-надвигово-покровных дислокаций слоистых пород земной коры возникает с завидным постоянством. Существует уверенность в том, что эта задача давно решена – названные дислокации возникают как реакция слоистых пород на боковое, в субгоризонтальном направлении, сжатие в результате приложенного к ним внешнего давления. Остается только найти источник такого давления. Предложены разные варианты решения этого вопроса. Однако тщательное изучение морфологии тектонических дислокаций разных масштабов, детальнейшее изучение сейс-

мичности некоторых территорий, результаты современных измерений тектонических движений земной коры методами геодезии вынуждают предположить, что возможно принципиально иное решение задачи.

В истории изучения деформаций коры/литосферы Земли за последние полтора века мы можем выделить два основных этапа. Первый продолжался приблизительно 100 лет – с середины XIX до середины XX в. Господствовавшая в геотектонике в это время геосинклинальная концепция была основана на геологических данных о континентах. В ее основе – представление о существовании на континентах



*Немецкий геофизик Альфред Вегенер.*

обширных приподнятых прочных платформ и протяженных глубоких прогибов земной коры (геосинклиналей), заполненных различными слоистыми отложениями. Эти прогибы впоследствии, при сближении смежных платформ сдавливаются и преобразуются в горные подвижные пояса со сложной внутренней структурой. Предполагалось, что упомянутое сближение платформ связано с остыванием и соответствующим сжатием, “усадкой” изначально расплавленной мантии – части Земли, расположенной под корой. Прочно связанная со сжимающейся мантией более холодная земная кора в результате “сморщивается”, деформируется.

В основе второго этапа изучения геодинамики лежит представление о свободном плавании, дрейфе континентов по более пластичному веществу под корой. Одним из первых эта идея озарила в 1915 г. немецкого геофизика Альфреда Вегенера (1880–1930; Земля и Вселенная, 1980, № 6). Мысль, что континенты могут двигаться, выглядела в то время совершенно неприемлемой. Эта идея была возрождена в 1960-х гг. в виде уже более обоснованной плейттектонической концепции<sup>1</sup>. Она

<sup>1</sup>Новая глобальная тектоника / М. : МИР, 1974. 472 с.

подразумевает, что земная кора/литосфера Земли разделена на литосферные плиты разного размера и что они движутся. Представление о существовании и дрейфе этих плит базируется главным образом на геофизических материалах, преимущественно относящихся к океанам (Земля и Вселенная, 1974, № 5; 1975, № 2; 1976, № 2; 1978, № 2; 1994, № 3). Возникшие представления были экстраполированы на территории континентов. Это привело к отрицанию за ненадобностью геосинклинальной концепции. Подвижные пояса в плейттектонической концепции считаются результатом деформирования нормальной океанической земной коры при сближении, столкновении (конвергенции, коллизии) смежных литосферных плит.

Геосинклинальная и плейттектоническая концепции формирования сложной тектонической структуры подвижных поясов Земли считают следствием сближения смежных платформ, в одном случае, или литосферных плит – в другом, со сдвливанием, деформированием расположенных между ними менее жестких, более податливых частей земной коры.

В последние 15–20 лет получили широкое применение принципиально новые методы исследования тектонических процессов на Земле: высокоточные гео-

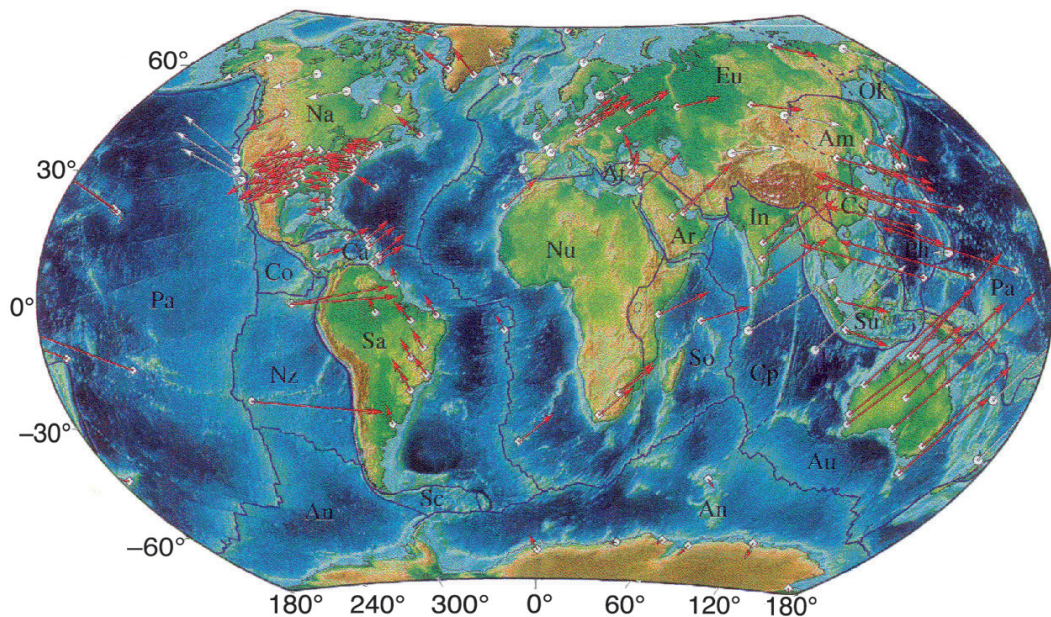
дезические измерения горизонтальных и вертикальных смещений геодезических пунктов с использованием космической навигационной системы GPS (глобальное определение местоположения; Земля и Вселенная, 2006, № 1). Точность измерений скорости горизонтальных смещений пунктов GPS и тем самым смещений элементов тектонической структуры Земли, на которых эти пункты располагаются, доходит до долей миллиметра в год.

До появления таких измерений исследователи, работающие в области наук о Земле, могли заниматься только анализом, реконструкцией, интерпретацией, осмыслением доступных наблюдению конечных результатов тектонических, геохимических, геофизических и других процессов, происходивших на Земле. Но сами процессы наблюдению были недоступны. Ситуация принципиально изменяется в случае использования геодезических измерений. Тектонические движения элементов структуры Земли наблюдаются и измеряются непосредственно, сами по себе. В получаемых результатах отсутствуют какие-либо элементы домысливания. Решается не обратная, а прямая задача. Поэтому смещения земной коры, устанавливаемые при повторных измерениях, мож-

но рассматривать как “истину в последней инстанции”. Использование результатов геодезических измерений позволяет в значительной степени уточнить и в определенной, иногда весьма существенной степени пересмотреть ранее сформулированные представления, проверить различные существующие реконструкции. Это, возможно, означает переход к третьему, пока не имеющему названия этапу геодинамических построений.

О НЕКОТОРЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ ПЛЕЙТТЕКТОНИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ

Согласно представлениям плейттектонической концепции, земная кора/литосфера разделяется на семь крупных литосферных плит: Евразийскую, Африканскую, Аравийскую, Индо-Австралийскую, Северо- и Южно-Американскую, Антарктическую и Тихоокеанскую. Имеется серия плит меньшего размера: например, Наска, Анатолийская, Зондская и некоторые другие, а также выделяются достаточно многочисленные микроплиты. Подвижные пояса континентов (например, Альпийско-Индонезийский), согласно плейттектонической концепции, представляют собой мозаичные области, состоящие из изначально разрозненных



Карта глобального распределения векторов скоростей горизонтальных (направлений и величин) горизонтальных смещений геодезических пунктов (показаны стрелками), расположенных на основных литосферных плитах: Na – Северо-Американской, Sa – Южно-Американской, Co – Кокос, Ca – Карибской, Pa – Тихоокеанской, Nz – Наска, An – Антарктической, Sc – Шотландской, Eu – Евразийской, Ok – Охотской, Am – Амурской, Cs – Южно-Китайской, Nu + So – Африканской (Нубийско-Сомалийская), At – Анатолийской, Ar – Аравийской, In + Au – Индо-Австралийской, Su – Сундской, Ph – Филиппинской. Из работы Sella G.F., Dixon T., Mao A. REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy // *Journ. Geoph. Res.*, 2002. V. 107. № 4. P. 1–32.

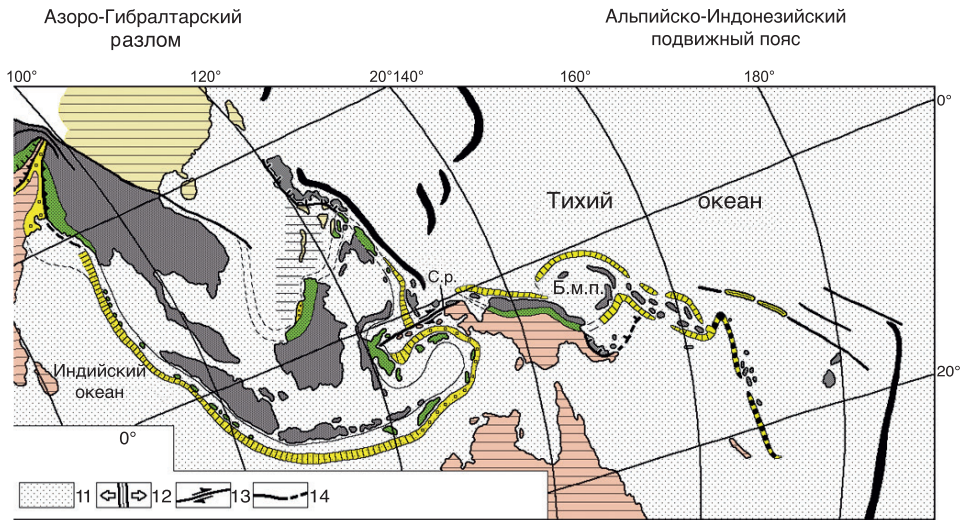
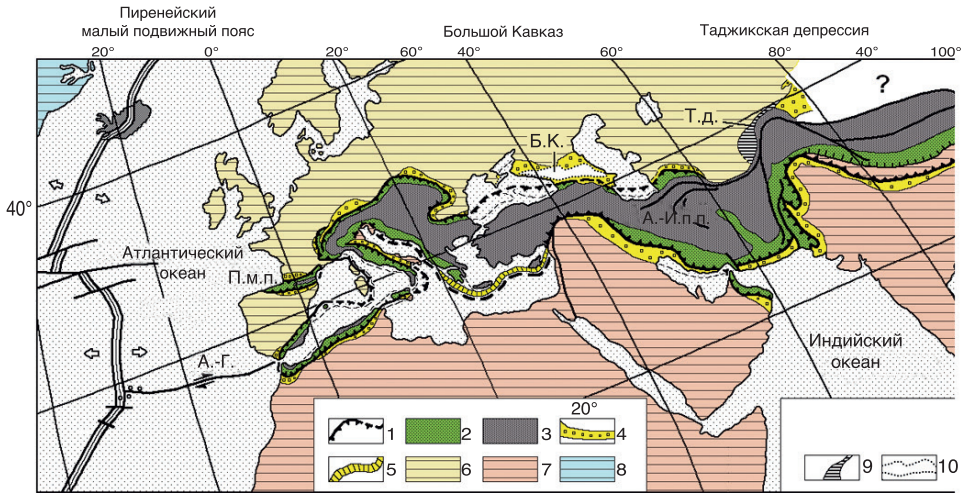
самостоятельных блоков и микроплит земной коры/литосферы, спрессованных при сближении смежных крупных литосферных плит. Иными словами, для земной коры/литосферы Земли в целом и подвижных поясов, в частности, с точки зрения плиттектонической концепции, характерна дискретность элементов струк-

туры. Существенно, что подвижные пояса при сближении смежных плит должны, согласно этой концепции, деформироваться, их ширина должна уменьшаться.

Однако, судя по существующим геологическим данным, Альпийско-Индонезийский и другие пояса того же типа (Уральский, Верхояно-Колымский, Се-

веро-Атлантический) устроены иначе<sup>2</sup>. Названный пояс представляет собой самостоятельный, пространственно замкнутый элемент структуры земной коры/литосферы, обладающий устойчивой осесимметричной зональностью, прослеживаемой практически непрерывно на всем его протяжении около 18 тыс. км: от Гибралтарского

<sup>2</sup>Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В. Автономная и плиттектоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений/ М.: ГЕОС, 2017. 612 с.



разлом Соронг, Бисмаркский малый подвижный пояс

Западная (а) и восточная (б) части тектонической схемы Альпийско-Индонезийского подвижного пояса: 1 – внешняя граница покровно-надвиговых сооружений Альпийско-Индонезийского подвижного пояса, Пиренейского и Бисмаркского малых подвижных поясов (в Гималаях – внешняя граница горного пояса); 2 – Внешняя зона подвижного пояса; 3 – Внутренняя зона; 4 – передовые прогибы; 5 – глубоководные желоба; 6 – Евразийская литосферная плита; 7 – Африканская, Аравийская и Индо-Австралийская литосферные плиты; 8 – Северо-Американская литосферная плита; 9 – Таджикская депрессия; 10 – Большой Кавказ; 11 – акватории океанов и морей; 12 – Срединно-Атлантический хребет; 13 – крупные сдвиговые зоны; 14 – крупные разломные зоны. (Из работы Шевченко В.И., Лукка А.А., Гусевой Т.В. Автономная и плиттктоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений/ М. : ГЕОС, 2017. 612 с.)



перешейка на западе до Индонезии на востоке. Выделяются Внутренняя, осевая зона, и окаймляющая ее с севера и с юга Внешняя зона. Разделение на блоки в пределах подвижного пояса отсутствует. Тектоническая структура подвижного пояса образуется не блоками, а чешуйчатыми надвигами, тектоническими покровами (по форме и расположению те и другие напоминают пластины рыбьей чешуи) и сопряженными с ними складками. Они не нарушают упомянутую общую зональность пояса. Следовательно, для подвижного пояса характерна не дискретность, а связность тектонической структуры, поэтому можно утверждать, что одновременно (и параллельно) на Земле существуют тектонические структуры двух типов: дискретные структуры (плиты, блоки, подразумеваемые плейттектонической концепцией) и континуальные, связанные, целостные структуры подвижных поясов.

Ряд ученых (А.Л. Яншин, А.Е. Шлезингер, И.В. Хворова, Б.Г. Лутц и др.) показали, что состав и характер изменчивости осадочных отложений Альпийско-Индонезийского подвижного пояса и одновозрастных отложений океанов, продукты магматических и вулканических процессов тех и других существенно различны. Анало-

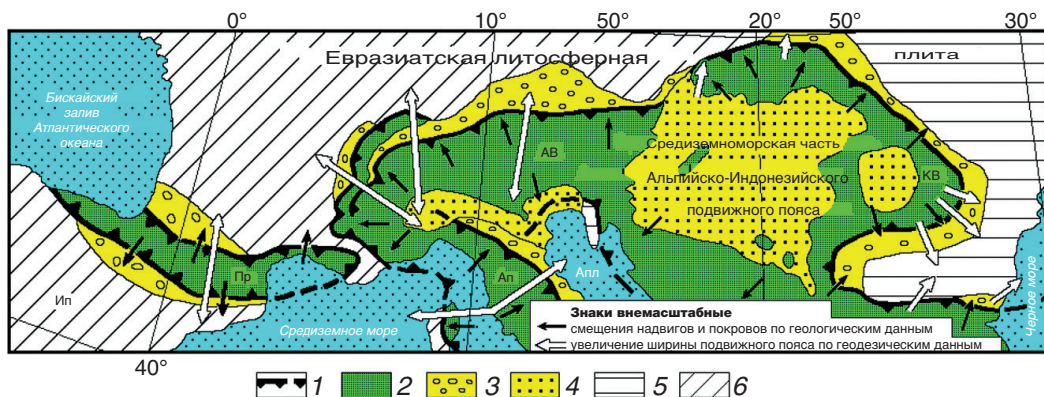
ги упомянутых Внутренней и Внешней зон подвижных поясов в пределах океанов отсутствуют. Это говорит о том, что подвижные пояса континентов изначально не были частями океанических бассейнов. Все это противоречит точке зрения плейттектонической концепции на подвижные пояса континентов и заставляет вернуться (применительно только к подвижным поясам) к представлениям геосинклинальной концепции.

Результаты высокоточных геодезических измерений современных горизонтальных смещений литосферных плит подтверждают в глобальном масштабе реконструкции таких смещений, сделанные в рамках плейттектонической концепции. В частности, измерено предполагавшееся ранее сближение Африканской, Аравийской и Индо-Австралийской литосферных плит с Евразийской плитой, расширение Атлантического и Индийского океанов, расширение срединно-океанических хребтов. Однако аналогичные геодезические измерения, произведенные в пределах подвижных поясов и некоторых отдельных подвижных сооружений (Пиренеи, средиземноморская часть Альпийско-Индонезийского пояса, Индонезия, Большой Кавказ, Таджикская депрессия, Урал) показали, что эти тектониче-

ские элементы Земли в процессе формирования их сложной внутренней структуры не сужаются, как это подразумевается и геосинклинальной, и плейттектонической концепциями, а становятся шире. Это свидетельствует об одновременном и параллельном существовании на Земле геодинамических процессов двух типов – *плейттектонического* и *автономного*, соответствующих упомянутым тектоническим структурам двух типов – *дискретных плит* и *связных подвижных поясов*.

АВТОНОМНАЯ ГЕОДИНАМИКА  
АЛЬПИЙСКО-  
ИНДОНЕЗИЙСКОГО ПОЯСА

Подвижные пояса (Альпийско-Индонезийский, Урало-Монгольский и другие) традиционно рассматриваются в рамках геосинклинальной и плейттектонической концепций как области латерального, бокового сжатия, деформирования в результате сближения смежных платформ или литосферных плит. Считалось (и считается), что вследствие этого ширина, соответственно, геосинклинальных или океанических бассейнов, а затем и возникших на их месте подвижных поясов в процессе их формирования существенно – в полтора-два раза – уменьшается.



Современное увеличение ширины Пиренеев–Апеннин–Альп–Карпат–Балканид, по результатам GPS-измерений: 1, 2 – внешние границы (1) покровно-надвиговых сооружений Альпийско-Индонезийского подвижного пояса и Пиренеев (2); 3 – передовые прогибы; 4 – наложенные впадины; 5, 6 – платформы древние (5) и эпигерцинские (6).

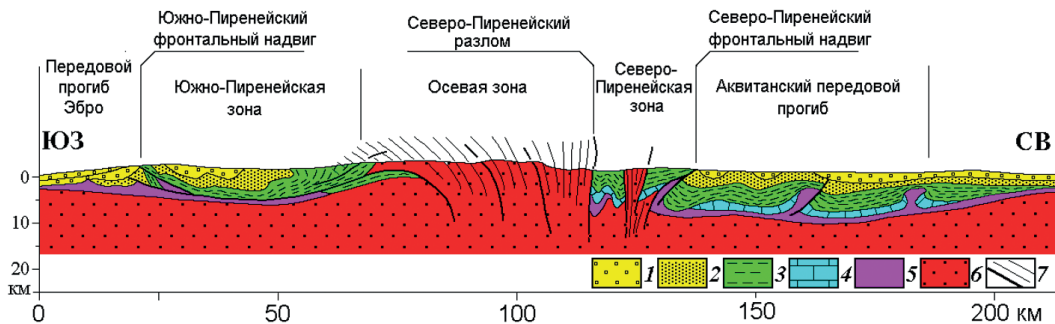
Обозначения: АВ – Альпы Восточные; Ап – Апеннины; Апл – Апулийский выступ Африканской литосферной плиты; КВ – Карпаты Восточные; Пр – Пиренеи; Ип – Иберийская литосферная плита. Рисунок авторов.

Однако существующие геологические, геофизические и геодезические материалы по Альпийско-Индонезийскому и некоторым другим подвижным поясам и отдельным сооружениям позволили прийти к иному выводу. По мнению авторов, их тектоническая структура указывает не на раздавливание сближающимися платформами или плитами, а на активное, силовое расширение самих поясов и сооружение в результате процесса объемного расширения распора слагающих их слоистых пород.

Как уже упоминалось, основным типом дислокаций (например, Альпийско-Индонезийского подвижного пояса) являются

чешуйчатые надвижки и тектонические покровы (то есть дислокации, образующиеся при перемещении пластин, чешуй слоистых пород поверх рядом расположенных аналогичных отложений). При перемещениях не поверх них, а под ними возникают поддвижки. И в том, и в другом случае могут также образовываться сопряженные с ними складки. В пределах пояса те и другие характеризуются осесимметричным, так называемым дивергентным (двусторонним) расположением. Это означает, что на северном крыле пояса дислокации указывают (по геологическим данным) на перемещение материала слоистых горных пород в

северном направлении (это называется северной вергентностью дислокаций), а на южном крыле – в южном. В обоих случаях происходит удаление от оси пояса. Установлено, что дислокации с такими направлениями перемещений формировались здесь в позднеюрское, ранне- и позднемиоценовое, палеогеновое, миоценовое и плиоценовое время, то есть в течение последних 160 млн лет. При таких – в противоположных направлениях – ориентировках надвигов на “крыльях” пояса ширина соответствующей части пояса должна увеличиваться. С позиций плейттектонической концепции, указанные надвижки и покровы – это



Геологический профиль через центральную часть Пиренеев. Геологические возрасты слоистых пород обозначены: 1 – эоцен-олигоцен (24,6–54,9 млн лет); 2 – эоцен (38,0–54,9 млн лет); 3 – мел (65–144 млн лет); 4 – юра (144–213 млн лет); 5 – триас (213–248 млн лет); 6 – варисский (герцинский) комплекс (более 248 млн лет); 7 – разломы. (Из работы Шукрун П., Сэжуре М. Тектоника Пиренеев: роль сжатия и силы тяжести / Сила тяжести и тектоника. – М.: МИР, 1976. С. 154–168).

поддвиги пород пояса, образовавшиеся при перемещениях пластин пород на “крыльях” пояса во встречных направлениях, к оси пояса. Считается, что поддвиги формируются при сближении смежных литосферных плит. Ширина пояса при этом должна уменьшаться.

На территории Средиземноморья были проведены обширные геодезические измерения горизонтальных смещений GPS-пунктов, расположенных на различных элементах тектонической структуры региона. Эти измерения объективно зафиксировали увеличение ширины измеренной части Альпийско-Индонезийского пояса.

Это означает, что применительно к указанной представительной части пояса и геосинклиальная, и плиттектоническая концепции, предполагающие уменьшение его ширины в результате сближения смежных плит, оказываются непригодными.

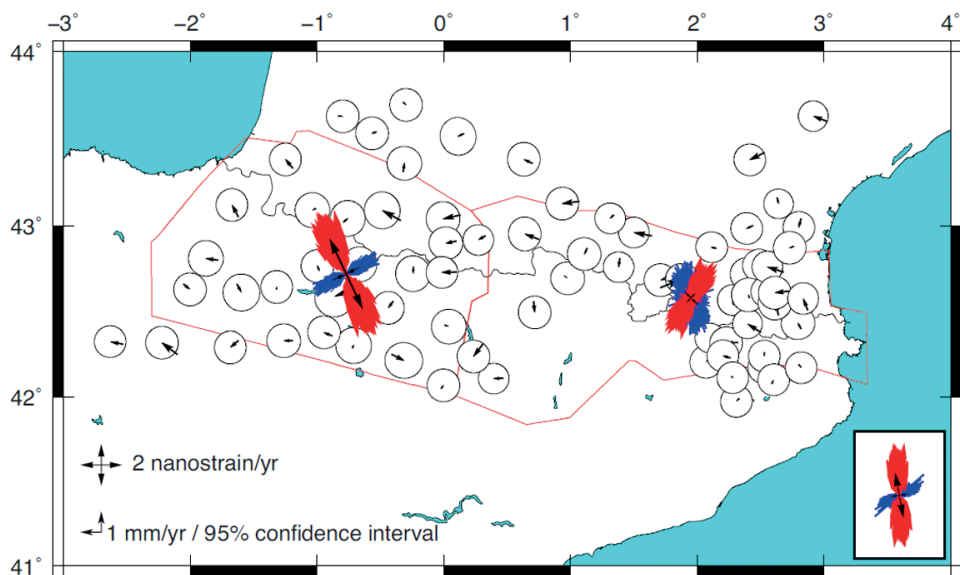
Аналогичная картина получается по горному району Пиренеев. Здесь также имеет место чешуйчатонадвиговая двусторонняя, с перемещениями и к северу, и к югу, тектоническая структура<sup>3</sup>. Согласно существующим плиттектоническим представлениям, она сформировалась в результате сжатия/сдавливания в процессе приближения Африканской и

Иберийской литосферных плит в северном направлении к Евразийской плите, со скоростью порядка нескольких миллиметров в год. Однако детальные геодезические измерения выявили увеличение ширины Пиренейского горного сооружения со скоростью 0,3–0,5 мм/год<sup>4</sup>.

Очень показательная картина получается на Большом Кавказе. Для него характерна складчато-чешуйчатонадвиговая тектоническая структура, свидетельствующая о субгоризонтальном, поперек Кавказа, сжатии. Большой Кавказ, согласно плиттектонической концепции, сформировался в результате сближения и столкновения здесь

<sup>3</sup>Шукрун П., Сэжуре М. Тектоника Пиренеев: роль сжатия и силы тяжести / Сила тяжести и тектоника. – М.: Мир, 1976. С. 154–168.

<sup>4</sup>Rigo A., Vernant P. et al. Present-day deformation of the Pyrenees revealed by GPS surveying and earthquake focal mechanisms 2011 until. // Geoph. Journ. Int., 2015. V. 201. P. 947-964.



Суммарные тензоры скорости деформаций, по результатам GPS-измерений, для западной и восточной частей Пиренеев. Совокупный для всего сооружения тензор – на врезке в нижнем правом углу. Светло-серым цветом показаны оси растяжения, темно-серым – оси сжатия (европейская система координат). Ширина Пиренеев увеличивается в год на 0,3–0,5 мм, или на несколько миллиардных долей от исходной ширины. (Из работы Rigo A., Vernant P. et al. Present-day deformation of the Pyrenees revealed by GPS surveying and earthquake focal mechanisms until 2011 // *Geoph. Journ. Int.*, 2015. V. 201. P. 947–964).

Аравийской и Евразийской литосферных плит. Этим представлениям соответствуют данные об ориентации осей напряжения/сжатия в очагах землетрясений. Судя по имеющимся данным, можно утверждать, что в пределах сейсмогенного слоя земной коры территории Кавказа преобладает резко выраженный надвиговый тип сеймотектонической деформации при преимущественной горизонтальной ориентации глав-

ной оси сжатия и вертикальной ориентации главной оси растяжения. Напряжение горизонтального сжатия материала земной коры Кавказа осуществляется в северо-восточном направлении и, в основном, – поперек элементов тектонической структуры Кавказа. Все это соответствует представлениям и геосинклинальной, и плейттектонической концепций.

Однако, как и в предыдущих случаях, иную картину

рисуют геодезические GPS-измерения на территории Большого Кавказа. В 1991–1997 гг. были выполнены первые геодезические GPS-измерения на Большом Кавказе. В 2010–2013 гг. измерения были проведены в осетинской части Большого Кавказа. Эти измерения позволяют уверенно говорить о том, что увеличивается ширина элементов тектонической структуры Большого Кавказа – зон Главного хребта и прогиба

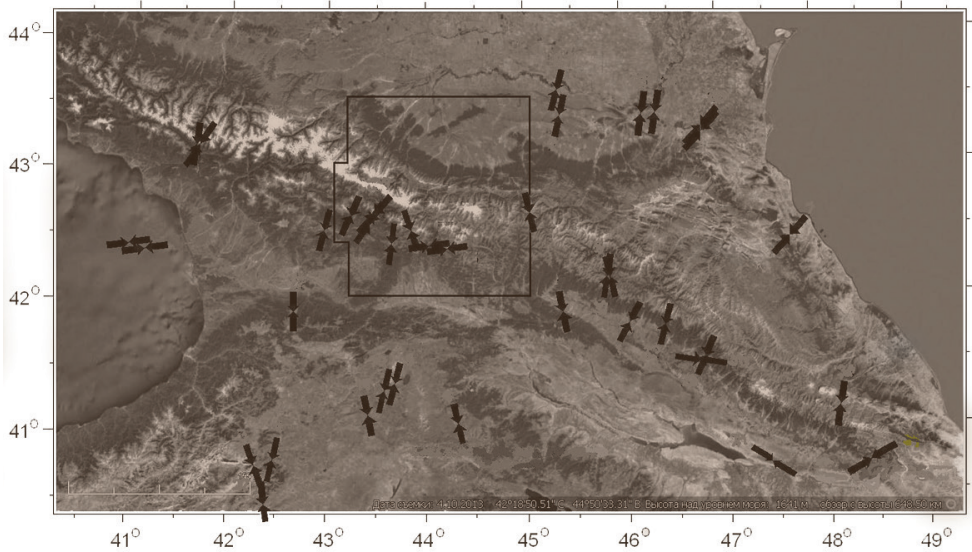


Схема распределения осей напряжений субгоризонтального сжатия (встречно ориентированные стрелки) земной коры на территории Кавказа. Прямоугольная врезка – местоположение района геодезических измерений в осетинской части территории Большого Кавказа. (По данным А.А. Лукка, 2017).

Южного склона, увеличивается ширина Большого Кавказа в целом<sup>5</sup>.

Существование на одной и той же территории упомянутой обстановки сжатия поперек Большого Кавказа и одновременного увеличения его ширины свидетельствует о том, что современная геодинамика этого сооружения может быть объяснена только процессами активного объемного расширения (распора), и, в первую очередь, процессами увеличения площади слоистых горных пород этого сооружения.

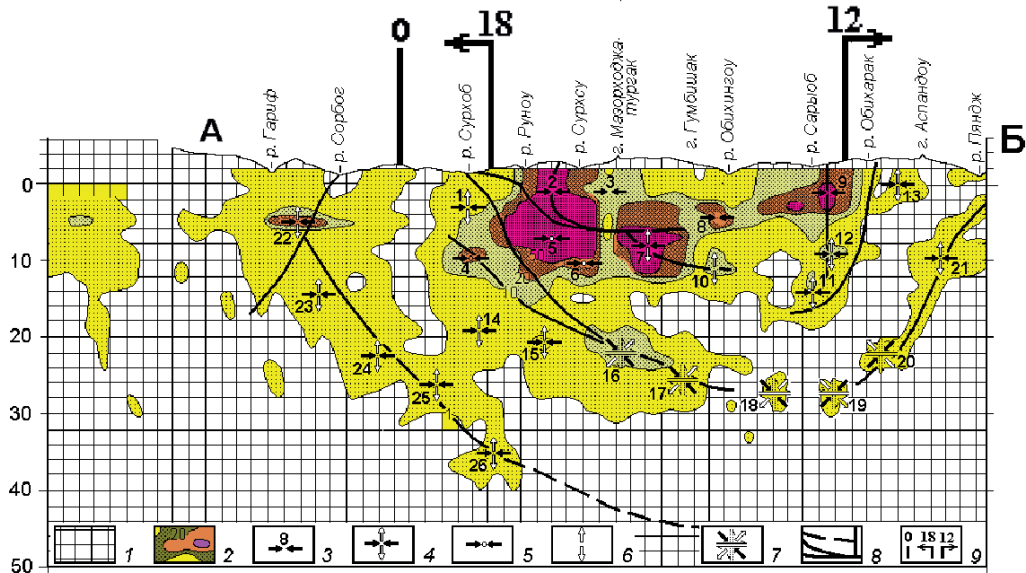
В подавляющем большинстве случаев направ-

ления современных, сегодняшнего дня смещений GPS-пунктов Большого Кавказа хорошо соответствуют направлениям смещений материала слоистых горных пород при формировании тектонических дислокаций сооружения. Но формирование этих дислокаций происходило в течение десятков и сотен миллионов лет геологической истории Кавказа. Такое соответствие указывает на то, что измеренные современные смещения элементов тектонической структуры региона – это продолжение геологического процесса

формирования этих элементов структуры.

Показательные результаты были получены при изучении Таджикской депрессии, расположенной в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня. Депрессия представляет собой глубокий прогиб, в осевой части которого кристаллический фундамент располагается на глубинах 25–30 км, а сам прогиб заполнен мощной толщей слоистых осадочных и вулканогенных пород, сформировавшихся в палеозое, мезозое и кайнозое. На крыльях депрессии располагаются надвиги, опреде-

<sup>5</sup>Шевченко В.И., Лукка А.А., Гусева Т.В. Автономная и плейттектоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений/ М. : ГЕОС, 2017. 612 с.



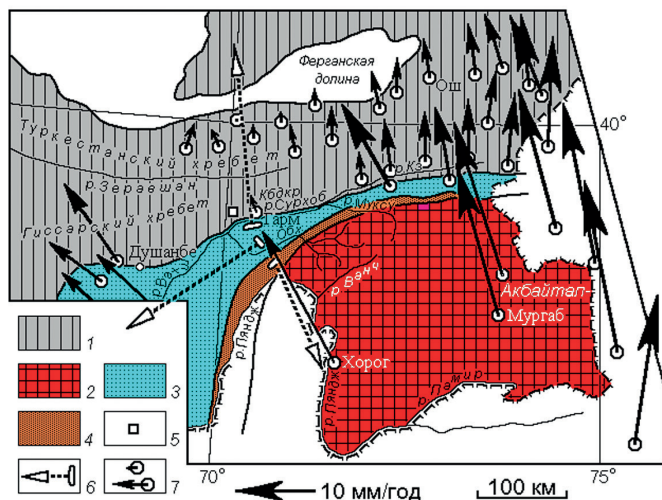
Сейсмичность и сейсмотектонические деформации (указаны маленькими стрелками) по линии профиля А–В, пересекающего Таджикскую депрессию (черные, залитые, встречно направленные стрелки означают сжатие; светлые, незалитые, opposитно направленные, – растяжение): 1 – сетка с размером квадратной ячейки 2 × 2 км, по которой подсчитывалось количество гипоцентров землетрясений; 2 – распределение плотности гипоцентров; изолинии проведены через 1, 10, 20 и 50 событий в ячейке; 3–7 – результаты реконструкции сейсмотектонических деформаций (СТД) по совокупностям фокальных механизмов землетрясений с  $M \geq 1$ : одноосное горизонтальное сжатие (3); надвиговый тип СТД (4); сдвиговый тип СТД (5); не характерный для всего района в целом тип СТД (срыв/взрез) (6); одноосное вертикальное удлинение (двухосное горизонтальное сжатие) (7); 8 – срывы-надвиги и сдвиг; 9 – направления и скорости перемещения геодезических пунктов на крыльях Таджикской депрессии (в мм/год) относительно неподвижного пункта (0) в Кабудкрымском массиве, на севере полигона. По данным В.И. Шевченко и др., 2017.

ляющие распределение очагов землетрясений. В результате детальнейшего изучения сейсмичности депрессии было установлено, что в пределах депрессии в подавляющем большинстве случаев имеет место обстановка субгоризонтальных, направленных поперек депрессии, напряжений сжатия.

Таджикская депрессия обычно рассматривается в рамках плейттектонической концепции как зона столкновения Индийской и Евразийской литосферных плит. Результаты многолетних (около 35 лет) детальных геологических и сейсмологических наблюдений, а также геодезических (светодаль-

номерных) измерений, проведенных здесь на Гармском геодинамическом полигоне Института физики Земли АН СССР в Таджикистане, показали, что, хотя Таджикская депрессия представляет собой область напряжений субгоризонтального сжатия, но ее ширина не сокращается, а увеличивается.

Карта расположения векторов среднегодовых скоростей горизонтальных перемещений геодезических пунктов Гармского полигона ИФЗ РАН, по измерениям 1967–1977 и 1981–1987 гг. пунктов GPS-измерений смежных территориях (евразийская система координат): 1 – Тянь-Шань; 2 – Памир; 3 – мезозойские и кайнозойские отложения Таджикской депрессии; 4 – палеозойские отложения южного крыла Таджикской депрессии (Дарвазская флексура); 5 – опорный пункт измерений на Гармском полигоне; 6 – обобщенные векторы скоростей горизонтальных смещений групп пунктов триангуляционных и светодальномерных измерений на Гармском полигоне; 7 – векторы скоростей горизонтальных смещений пунктов GPS-измерений. Сокращения на схеме: Кбд – хр. Кабудкрым; Об. – р. Обихингоу; р. Кз. – р. Кызылсу; Ср – р. Сурхоб. (Из работы Шевченко В.И., Лукка А.А., Гусевой Т.В./ Автономная и плиттектоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений/ М. : ГЕОС, 2017. 612 с.)



цепция) в полосе Гармского полигона можно оценить цифрами порядка 3,0 см/год,

Итак, для ряда частей подвижного пояса и подвижных сооружений установлено одновременное для одних и тех же частей земной коры существование, с одной стороны, напряженного состояния сжатия в субгоризонтальном направлении, а с другой – увеличение линейных размеров (то есть площади) этих же частей коры. Представляется, что это свидетельствует об активном увеличении объема (и площади) этих частей коры. Вследствие этого они перестают уместаться на том пространстве, которое они до этого занимали, в результате они сминаются в складки, рассекаются разломами; в результате формируются тектонические дислокации.

Существующие результаты массового изучения химического состава, строе-

ния (на микроскопическом уровне) осадочных и вулканогенных пород свидетельствуют о существовании привноса, внесения дополнительного минерального материала в эти породы и соответствующего увеличения их объема. Во всех рассмотренных случаях есть основания считать, что эти процессы никак не связаны со сближением смежных литосферных плит и с оказываемым ими давлением. Поэтому авторы считают необходимым говорить о существовании автономных, не связанных с перемещениями литосферных плит, причинах формирования тектонических дислокаций, действующих наряду с плиттектоническими.

Изложенные представления об автономном тектогенезе подвижных поясов и сооружений имеют значение для более адекватного понимания тектонических структур и геоди-

Надвиговые пластины северного крыла Таджикской депрессии смещаются в северном направлении на 18 мм/год, а такие же пластины южного крыла – на 12 мм/год в южном (в местной системе координат). Следовательно, увеличение ширины Таджикской депрессии (а не сужения ее, как того требует плиттектоническая кон-

намических процессов в земной коре при сооружении долговременных объектов. Они могут иметь практическое приложение при поиске полезных ископаемых, при любых горных работах по их добыче, при бурении на нефть и газ.

Производственники при этом исходят из существующих, сложившихся ранее представлений о тектонической структуре доступной для разработки полезных ископаемых части земной коры. Ошибочные представления в этом от-

ношении приводят в лучшем случае к удорожанию работ такого типа. Более адекватные действительности представления увеличивают шансы на решение производственных задач быстрее и с меньшими финансовыми затратами.

---

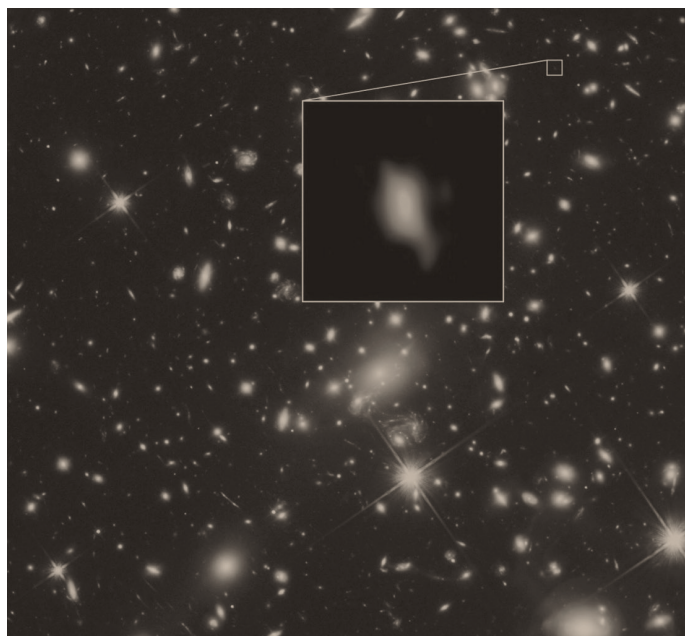
## Информация

---

### Самая древняя галактика

Вскоре после Большого Взрыва первые поколения звезд начали изменять химический состав примитивных галактик, медленно обогащая межзвездную среду кислородом, углеродом и азотом. Поиск самых ранних их следов прольет свет на химическую эволюцию галактик, включая нашу собственную. Наблюдения галактики MACS1149-JD1, находящейся в созвездии Льва на рекордном расстоянии – 13,28 млрд св лет от нас – с помощью радиотелескопов Обсерватории ALMA и 8,2-м телескопа VLT Европейской Южной обсерватории (ESO, Чили) подтверждают, что она оказалась самой далекой от нас. В такой древней галактике (она появилась в тот период, когда Вселенной было всего 500 млн лет) был впервые обнаружен кислород.

Группа астрофизиков восстановила историю звездообразования в галактике MACS1149-JD1, используя данные, полученные с помощью KTX и космической обсерватории “Спитцер”. Рожде-



*Древняя галактика MACS1149-JD1, находящаяся в созвездии Льва на расстоянии 13,28 млрд св лет от нас. Популяция звездообразования показана во врезке крупным планом. Снимок получен с помощью 8,2-м телескопа VLT Европейской Южной Обсерватории. Фото ESO.*

ние звезд в ней прошло две стадии: через 250 и 500 млн лет после Большого взрыва. Предполагается, что некоторое время подавляло бы образование новых звезд; затем газ снова возвращался в галакти-

ку, что привело бы ко второй вспышке звездообразования. Именно эти выбросы ионизированного кислорода были обнаружены с помощью радиотелескопов ALMA.

*пресс-релиз  
Обсерватории ALMA,  
16 мая 2018 г.*





## Тайны Эльбрусской вулканической области

А.Л. СОБИСЕВИЧ,  
член-корреспондент РАН

Л.Е. СОБИСЕВИЧ,  
доктор технических наук Институт физики Земли  
им. О.Ю. Шмидта РАН

---



Приэльбрусье – это высокогорье в верховьях рек Баксана, Малки и Кубани, примыкающее к Эльбрусу. К чудесным творениям природы относится Баксанское ущелье, подъезжая к кото-

рому мы видим горные цепи с вершинами высотой более 4 тыс. м, покрытыми снежно-ледовыми шапками, входящие в Главный Кавказский хребет. Здесь подняли высоко в небо скальные башни красавица Шхельда и двурогая Ушба; ярко сверкает на солнце громада Донгузоруна, а чуть дальше высятся величественные Дыхтау и Ирикчат. Но над всем этим районом, конечно, господствует Эльбрус. Две его величественные белые главы невольно притягивают к себе взоры путешественника, вызывая неописуемый восторг. Слово “Приэльбрусье” в каждом, посетившим этим мес-



та, вызывает свои особенные ассоциации, но у многих оно связано с Эльбрусом, с попыткой покорения его вершин и разгадкой тайн этого удивительного района.

ЭЛЬБРУС – ЭТО ВУЛКАН

Сказочная красота долин и ущелий Приэльбрусья очаровывает своим величием. Однако она в одно мгновение может измениться, показав свою обратную сторону. Сегодня мы знаем, что Эльбрус – это активный вулкан, который своей громадой нависает над южными регионами России.

Вулканы делятся, в зависимости от степени активности, на действующие, спящие и потухшие. Действующим принято считать вулкан, который извергался в исторический период времени или в голоцене (эпоха четвертичного периода, длящаяся последние 12 тыс. лет). Есть еще и понятие “активный”. Так, если вулкан имеет фумаролы (трещины или отверстия, располагающиеся в кратерах, на склонах и у подножия вулканов – источники вулканических газов), то некоторые ученые относят его к активному, а некоторые – к потухшему. Спящими считаются недействующие вулканы, на которых возможны извержения, а потухшими – на которых они маловероятны (например Кара-Даг в Крыму – потухший около 150 млн лет назад).

Эльбрус – двуглавый вулкан, расположившийся в Боковом хребте, соединяется с Главным Кавказским хребтом перемычкой

Хотютау. С вулканической постройки Эльбруса “стекают” многочисленные ледники, общая площадь которых – около 139 км<sup>2</sup>.

#### ЭЛЬБРУССКАЯ ВУЛКАНИЧЕСКАЯ ОБЛАСТЬ

На территории России нередко проявления современного вулканизма, в том числе и в отдельных районах Северного Кавказа. Научные исследования в южных регионах России приобрели более активный характер в начале нынешнего столетия. Ученые понимали, что на территории России, вблизи жизненно важных и густонаселенных ее центров существует объект с новейшими и современными проявлениями вул-

канизма – Эльбрусская вулканическая область.

В центре этой области находится гора Эльбрус – двухвершинный вулкан, образовавшийся около 700 тыс. лет назад. Его вулканическая постройка представляет собой массив округлой формы с поперечниками – у основания – около 18 км и 1,2–1,5 км – на высоте 5300 м; выше поднимаются два сросшихся вулканических конуса.

Работы ученых ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН и других институтов Российской академии наук свидетельствуют о том, что Кавказ следует отнести к “активным” регионам планеты Земля. Исследование условий формирования его геологических структур, в том чис-



*Двухвершинный стратовулкан Эльбрус (Северный Кавказ). Западная вершина имеет высоту 5642,7 м, Восточная – 5614 м. Расстояние между вершинами – 1450 м, а перемычка между ними (седловина) находится на отметке 5376 м. Фото Д.В. Лиходеева.*



*Ледники Эльбруса “стекают” по его склонам. Фото Д.В. Лиходеева.*

ле уточнение причин повышенной сейсмичности, активизации молодого вулканизма и других пока не разгаданных природных процессов, отражают главные направления в этой области, которые ученые сегодня изучают. На Кавказе удастся наблюдать следы интенсивных неотектонических движений, крупные изостатические аномалии (гидростатически равновесное состояние земной коры, при котором менее плотная земная кора средней плотностью  $2,8 \text{ г/см}^3$  как бы “плавает” в более плотном слое верхней мантии – астеносфере), высокий тепловой поток на фоне все возрастающей сейсмичности и проявлений магматизма.

Собственно магма – источник продуктов вулканизма. Это – расплав, образующийся в мантии или в пределах земной коры при определенных значениях температур и давлений. Подъем магматических расплавов к поверхности, всплывание вещества приводит к образованию магматичес-

ких очагов. Вулканизм и сейсмичность – генетически связанные процессы. Пробуждение вулкана, как правило, сопровождается рядом явлений – всплеском сейсмической и геоакустической активности, преимущественно это – слабые сейсмические события, возникающие при движении магмы к поверхности и сопровождающие непосредственно извержение.

За последние 10 тыс. лет Эльбрус извергался по меньшей мере восемь раз. Примерно 1800 лет тому назад вулкан успокоился и с тех пор “дремлет”. Результаты наблюдений с использованием самых современных геофизических инструментальных методов свидетельствуют о том, что слабая сейсмическая активность в районе вулканической постройки связана, в основном, с движением ледников. Однако вероятность новых вулканических проявлений, в том числе и катастрофического масштаба, разумеется, исключать нельзя. Как это ни пара-

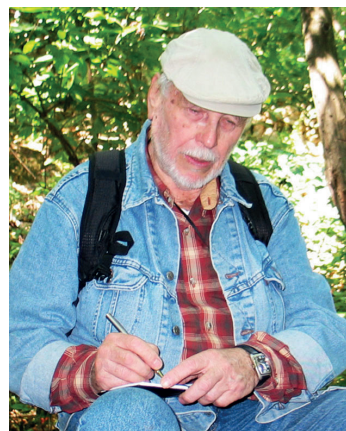
доксально, но вулканологическая изученность Северного Кавказа, несмотря на достижения в части познания отдельных вулканических объектов на его территории, все еще не дает основания для сколько-нибудь определенного предсказания о месте, времени и масштабе вероятных катастрофических событий эндогенной природы. Несмотря на то, что развиваемые учеными подходы к такому многомерному явлению, как вулканизм, многочисленны, разнообразны и тщательно изучены, но они не способны воссоздать целостную картину процесса, если не установлена взаимосвязь между всеми исследуемыми вопросами новейшего вулканизма на Северном Кавказе.

Такую целостную картину и попытались построить ученые ИФЗ РАН в конце 1990-х и начале 2000-х гг. Это было тяжелое время: финансирование полевых работ практически прекратилось, но жажда новых открытий и потребность в непрерывных научных исследованиях стала определяющей. Группа ученых нашего института, возглавляемая ведущим вулканологом, доктором геолого-минералогичес-

ких наук Ю.П. Масуренковым, развернула масштабные полевые работы на Северном Кавказе. Следуя учению о вулканических центрах, развиваемому Юрием Петровичем, в Эльбрусской вулканической области удалось выделить пять таких геологических объектов, последовательно сформировавшихся в течение ближайших 8 млн лет. Наиболее древний из них – Пятигорский вулканический центр – более всего соответствует заключительной стадии развития, с характерными проявлениями гидротермальной активности. Современная мантийная флюидно-магматическая система Пятигорья “перекладывает” основную свою функцию – выноса тепловой энергии глубин на подземные воды и на собственные газово-жидкие теплоносители, передавая им тепло магматических расплавов.

*Вулканолог, ведущий научный сотрудник ИФЗ РАН доктор геолого-минералогических наук Ю.П. Масуренков на склонах лакколита Бештау. Пятигорский вулканический центр. Фото С.М. Долова.*

Вулканы имеют в своем основании, как минимум, один магматический очаг. Объемы магматических очагов могут быть значительными – до сотен кубических километров. От очага к поверхности простирается магмовод – протяженная трещина, или вулканический канал; иногда образуются побочные каналы, “ответственные” за формирование дополнительных центров извержения. При этом расплавленная горная порода в магматических очагах может находиться в стабильном состоянии и никак себя не проявлять – тогда ученые говорят: вул-



кан “дремлет”. В случае застывания магматических пород в пределах земной коры формируются интрузивные или плутонические горные породы. Подобные структуры, внедрившиеся в земную кору и застывшие в ней в прошлые геологические эпохи, нередко обнажены в результате эрозии в настоящее время. Например: лакколиты Пятигорска – своего рода несформировавшиеся вулканы, субвулканические тела. При определенных условиях (наличие разрывных нарушений в земной коре, интенсивное омывание очага глубинными флюидами) магма, внедряясь в ослабленные зоны земной коры, достигает земной поверхности и изливается в



*Сотрудники экспедиции ИФЗ РАН – А.Б. Чулков, А.Л. Собищев и Ю.П. Масуренков на маршруте. Пятигорский вулканический центр. Фото С.М. Долова.*



*Извержение вулкана Пинатубо на Филиппинах, произошедшее 10 июня 1991 г.*

виде лавы, а значительная часть растворенных в ней газов поступает в атмосферу. Это и есть вулканическое явление или вулканизм.

Движущей силой извержения являются газы, растворенные в магме. В случае если возникает трещина или другие условия для спонтанной дегазации расплава, это приводит к тому, что магма буквально вскипает. Происходит вспенивание магматического расплава, а уменьшение давления при подъеме к поверхности усиливает этот процесс подобно цепной реакции. Тот же эффект мы наблюдаем, когда открываем банку с газированной жидкостью, которую предварительно энергично встряхнули. Вулканические продукты (в особенности газовая составляющая) определяют “стиль извержения” и, в соответствии с ним, различные формы вулканических построек.

Наибольший интерес в научном плане представляет Эльбрусский вулканический центр: гидротермальные процессы, определяемые и провоцируемые деятельностью периферического магматического очага, можно наблюдать на земной поверхности – тепловые аномалии и многочисленные источники углекислых минеральных вод.

Выполненные исследования показали, что количество выделяемого из очага тепла пока еще несоизмеримо с его накоплением за счет мантийного питания. Поэтому вулкан остается потенциально опасным из-за вероятности извержений. Прогноз основан на выявленной закономерности, определяющей место, время и длительность вулканических событий в процессе “миграции” центров тектоно-магматической активности в Эльбрусской вул-

канической области. Согласно установленным закономерностям, ожидаемая продолжительность вулканизма в этой области может составлять еще порядка миллиона лет, что свидетельствует о возможности возобновления деятельности Эльбруса в будущем.

МОЖНО ЛИ  
СПРОГНОЗИРОВАТЬ  
ВУЛКАНИЧЕСКОЕ  
ИЗВЕРЖЕНИЕ?

Катастрофические извержения вулканов относятся к разряду трудно, но все же предсказуемых стихийных бедствий. К счастью, это довольно редкое явление в жизни одного поколения людей. Человеческая память сохранила грозные события прошлого. Ими были:

- крупное извержение вулкана Санторин в Эгейском море, сопровождавшееся образованием кальдеры размером 7,5–11 км (датированное 1645–1600 гг. до н.э.); вызвало цунами высотой до 100 м, уничтожившее минойскую цивилизацию Крита;
- сильное извержение Везувия в 79 г. н.э., погубившее Помпеи и Геркуланум;
- грандиозное извержение вулкана Тамбора в Индонезии, произошедшее

10 апреля 1815 г.; оно унесло жизни около 92 тыс. людей; на месте исчезнувшей вершины вулкана образовался огромный кратер диаметром 6,0 × 6,5 км и глубиной до 700 м;

– гигантская катастрофа 26–27 августа 1883 г., сопровождавшаяся взрывом вулкана Кракатау в Индонезии;

– 21 мая 1902 г. произошло катастрофическое извержение вулкана Мон-Пеле на о. Мартиника; погибло 30 тыс. жителей Сен-Пьера;

– катастрофа 30 апреля 1980 г. – взрыв вулкана Сент-Хеленс в США;

– извержения вулканов Безымянного на Камчатке в 1955–1956 гг., Эль-Чичона в Мексике (29 марта и 3–4 апреля 1982 г.), Пинатубо на Филиппинах (10–15 июня 1991 г.) и Серро-Хадсон в Чили (в августе–октябре 1991 г.).

Существуют легенды, что в давние времена для предотвращения извержений жители Никарагуа бросали в жерло вулкана молодых девушек. Этот пугающий древний обычай ушел в прошлое. Ученые сегодня могут достаточно точно определить форму, размеры и глубину залегания магматических очагов активных вулканов и с помощью современных приборов “держать руку на пульсе” опасного природного явления. Вулканы сегодня вполне предсказуемы: специалистам не-

обходимо всего лишь правильно расставить вокруг вулкана, объединив в единую систему инструментального мониторинга, научные приборы. Далеко не на всех вулканах такие системы установлены.

Основанная в 1841 г. старейшая вулканологическая обсерватория “Везувiano” (Неаполь, Италия; <http://www.ov.ingv.it/ov/>), куда стекаются сведения от сети сейсмостанций, гравиметрических и GPS-пунктов наблюдений. Здесь обрабатываются данные о количестве и составе газов в фумаролах, о данных дистанционного зондирования; можно сказать, что малейшее движение магмы под вулканом не остается незамеченным.

Подобный проект российские ученые пытаются сделать и на Эльбрусе. Ближайшая к Эльбрусу сейсмостанция расположена в 20-ти км и при всем желании мы не можем “услышать” те самые слабые землетрясения, которые происходят в окрестности магматического очага. Да и недостаточно одной сейсмостанции, ведь в горах происходит большое количество слабых землетрясений, связанных с движением ледников. Эти сигналы можно отличить от вулканических землетрясений, только определив их глубину, а для этого нужно установить несколько сейсмостанций вокруг вулкана. Изучая

тайны Эльбруса, российские ученые создают надежные, оснащенные современными приборами, технологии; их использование поможет предупредить о катастрофическом извержении жителей Кавказа.

Сотрудники нашей лаборатории обратили внимание на вулканическую тематику с началом цикла экспедиционных работ на Северном Кавказе. Лаборатория традиционно занималась изучением пространства упругих волн в различных слоистых средах, в том числе – в геофизической среде – с присутствием неоднородностей, с различными включениями. Магматический очаг вулкана – пример такого включения. Возникла идея попробовать применить нашу теорию к вулкану Эльбрус. Коллеги-физики помогли нам организовать геофизический эксперимент в штольне Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН.

СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

Не так давно на научно-просветительском форуме “Ученые против мифов”, авторы статьи пытались разрушить некоторые “страшилки” о “супервулканах” и обратились к залу с вопросом: «Как хорошо мы знаем Землю? Насколько глубоко мы проникли в недра планеты?»?



*Лаборатория на отметке 3,9 км в штольне Баксанской нейтринной обсерватории РАН в Баксанском ущелье. Измерительные постаменты с установленными геофизическими информационно-измерительными комплексами; это такие приборы как сейсмометры различных типов, кварцевые наклонометры и гравиметр конструкции доктора технических наук Д.Г. Гриднева; магнитные вариометры, температурные станции и вспомогательное оборудование. Северо-Кавказская геофизическая обсерватория. Фото С.М. Долова.*

Приятно удивило то, что рядовые слушатели форума называли значения от 10 до 50 км – то есть в пределах земной коры. Правильный ответ: 12,5 км, Кольская сверхглубокая скважина – пока непревзойденное достижение советских времен.

Баксанская нейтринная обсерватория – также величайшее достижение периода расцвета фундаментальной науки в СССР; это уникальный научный объект, созданный иск-

лючительно для проведения фундаментальных исследований в области ядерной физики, физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино (Земля и Вселенная, 2011, № 1). Обсерватория представляет собой подземный комплекс, образованный вокруг двух горизонтальных тоннелей, пройденных “Метростроем” в массиве горы Андырчи в Баксанском ущелье. Именно в подземных лабораториях нам и удалось установить геофизические приборы – сейсмометры, наклонометры, магнитометры – и провести серию

экспериментов. Сейчас все инструменты работают в автоматическом режиме, а данные мы получаем посредством вездесущего интернета.

Аппаратурные комплексы обсерватории регистрируют “дыхание” магматических структур и определяют “степень готовности” вулкана к извержению. Это – надежные отечественные измерительные системы; они созданы выдающимися российскими учеными.

Кроме того, при изучении проблем вулканизма, сейсмичности и других природных процессов, связанных с катастрофами на Северном Кавказе, ученые ИФЗ РАН применяют новейшие геолого-геофизические и геодезические технологии, а также космические методы наб-



*Изобретатель и создатель уникального поколения кварцевых геофизических инструментов, установленных на Северном Кавказе, доктор технических наук Д.Г. Гриднев в рабочих помещениях Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН. Фото В.Н. Корягина.*

*А.Л. Собисевич (ИФЗ РАН) и В.В. Казалов (Баксанская нейтринная обсерватория РАН) устанавливают сейсмологическую аппаратуру в лаборатории, на отметке 1,5 км, в штольне Баксанской нейтринной обсерватории РАН. Фото Л.Е. Собисевича.*

---



людений. При этом в процессе изучения того или иного явления особое место отводится проблемам изучения неотектоники; обнаружению следов различных типов катастрофических событий, связанных с прошлой активностью вулкана; датированию последних извержений, произошедших в историческое время с целью определить частоту их повторяемости, что очень важно при прогнозе возможности возобновления вулканической активности. Анализ геофизических полей (гравитационного, теплового, сейсмического,

электромагнитного и других) позволяют получить информацию о глубинной внутренней структуре вулканической постройки (магматического очага и магматической камеры) и о динамических процессах, зарождающихся и развивающихся в геофизической среде, окружающей вулканический центр или будущий сейсмический очаг. Наибольшую важность представляет информация о гравитационных и сейсмических полях.

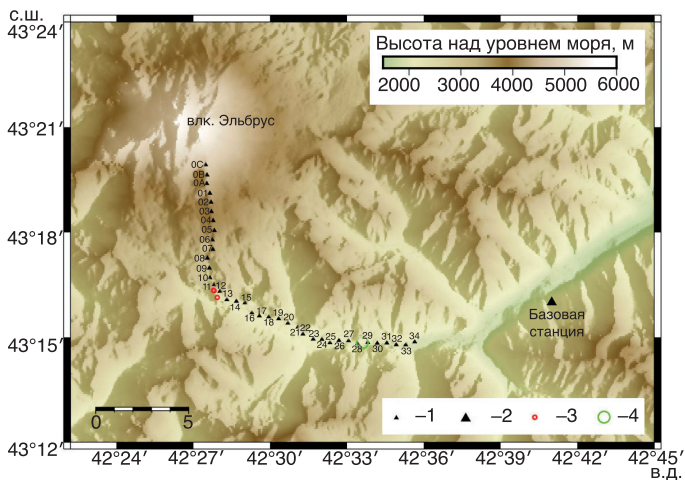
Многолетние исследования проводились в соответствии с широким спектром задач, ответы на которые помогут в предупреждении развития катастрофических событий на Северном Кавказе. Удалось показать, что в районе расположения вулкана Эльбрус, помимо современных датировок возраста лав, определения периодов максимальной вулканической активности, частоты ее повторяемости и объемов изверженного материала, других геологических, геодезических, геохимических и сейсмологических исследований, необходимо провести уточняющие гео-



*Проверка готовности сейсмологической аппаратуры на одном из постаментов Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН; перед проведением полевых работ в Баксанском ущелье и на вулканической постройке Эльбруса. Фото Л.Е. Собисевича.*

---





Профиль геофизических работ в 2015 г. в Баксанском ущелье и на склонах Эльбруса. Цифрами обозначены: 1 – точки измерений; 2 – базовая станция; 3 – отмеченные в ходе эксперимента поверхностные температурные аномалии; 4 – область сосредоточенной флюидной активности (“Поляна Нарзанов”). (Из статьи Д.В. Лиходеева и др. “Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования” // Вулканология и сейсмология, 2017. № 6. С. 28–32.)

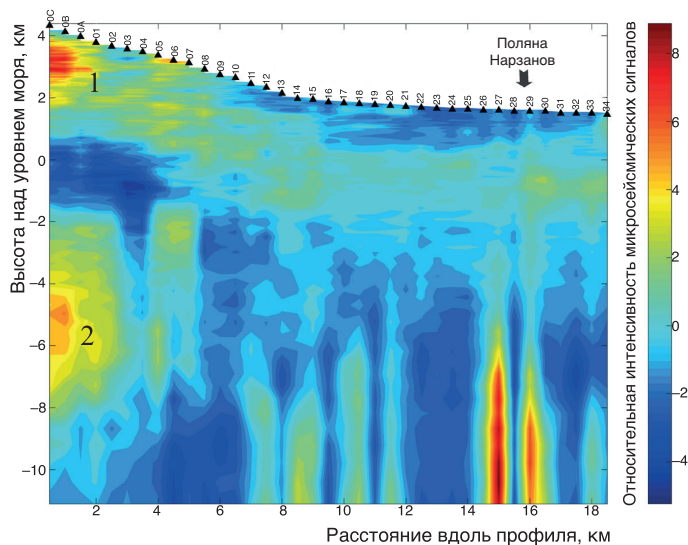
физические наблюдения – для того, чтобы определить относительное положение, размеры и динамику (скорость всплывания)

магматической камеры (очаги расплавленных пород, сформированные в литосфере). При этом необходимо обратить особое внимание на изучение динамических (резонансных и других) характеристик глубинного магматического очага. Эти и другие тайны Эльбрусского вулканического центра ученым постепенно удастся разга-

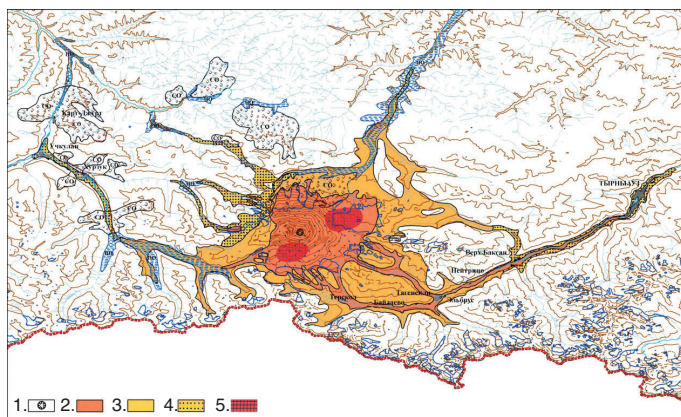
дать и использовать в задачах прогнозирования крупных природных катастроф в регионе.

Проведенные работы заставили Эльбрус начать открывать свои тайны: выделены локальные неоднородности литосферы, потенциально связанные с магматическим очагом и

Вертикальный геофизический разрез вдоль профиля, выполненного в 2015 г. по методу микросейсмического зондирования, позволяющего оценить глубинное строение вулкана Эльбрус. “Теплыми” тонами показаны относительно низкоскоростные области, пространственно совпадающие с контурами периферических элементов флюидно-магматической системы (1, 2). Над геофизическим разрезом показан профиль высот измерительных пунктов; условная система координат дана в соответствии с профилем. (Из статьи Д.В. Лиходеева и др. “Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования” // Вулканология и сейсмология, 2017. № 6. С. 28–32.)



Карта сценариев проявления вулканической опасности Эльбруса. (Собисевич А.Л. / Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Северо-Кавказская геофизическая обсерватория. Создание, анализ результатов наблюдений. М. : ИФЗ РАН, 2013. 512 с.)



магматической камерой вулкана Эльбрус. Установлено, что в этих областях земной коры имеют место аномально пониженные значения поля тектонической раздробленности; они рассматриваются как потенциальный магматический очаг, служивший в историческом прошлом “поставщиком” материала для извержений вулкана. Исследования глубинного строения вулкана с помощью различных геофизических методов позволили впервые уточнить относительные положения магматического очага и магматической камеры внутри вулканической постройки.

Теоретическая оценка резонансных особенностей магматических образований вулкана Эльбрус может быть выполнена при условии, что очаг в первом приближении полостью соответствующей конфигурации и размера в слоистой структуре и заполнен вязкой жидкостью. По результатам изучения строения магмати-

ческого очага и магматической камеры, с учетом механико-математического моделирования резонансных особенностей магматических образований и данных натурных наблюдений, подтверждено, что в пределах Эльбрусского вулканического центра есть “живые” магматические образования. Определены характерные размеры магматического очага и магматической камеры вулкана; выполнены оценки глубины залегания ее верхней границы, они уточнены и с помощью других геофизических методов (гравиметрии и магнитотеллурического зондирования). Проведенные исследования легли в основу принципиально нового “резонансного” метода контроля динамических процессов в магматических структурах вулканов центрального типа – когда изменение основной резонансной частоты магматической камеры свидетельствует о повышении внутри нее давления

в результате активного поступления магмы и выделения летучих.

Анализ геологической, геоморфологической, гляциологической и геофизической обстановок в районе вулканической постройки показал, что, независимо от места нахождения эруптивного центра, силы и типа возможного извержения Эльбруса, его активность может сопровождаться (помимо образования палящих туч) выделениями вулканических газов и другими явлениями, включая каменно-ледовые обвалы, сейсмодислокации, катастрофические лахары, образование подпрудных озер и наводнения.

Таким образом, разработка и освоение геофизических технологий мониторинга природных процессов в Эльбрусской вулканической области позволили ученым ИФЗ РАН на новом уровне подойти к проблеме изучения физических механизмов опасных природных процессов и на этой основе опреде-



*Одна из инструментальных станций Северо-Кавказской геофизической обсерватории с установленными на ней феррозондом, магнитовариационной станцией ИЗМИРАН и кварцевыми наклономерами конструкции Д.Г. Гриднева (ИФЗ РАН). Фото А.Л. Собисевича.*

лить сценарии развития возможных катастроф. Для вулканов – это карты вулканической опасности (можно сказать “зоны поражения” на различных расстояниях от конкретного вулкана).

Как вулкан себя проявит? Будет ли это взрыв с выбросом пепла в атмосферу? Сформируются ли пирокластические потоки (“палящие тучи”) – смесь раскаленных вулканических газов, пепла и обломков, средняя скорость движения которых по склонам достигает 80 км/ч, или же это будет “спокойное” излияние лавы? На эти вопросы наука сегодня отвечает, опираясь на знания о глубинном строении магматической питающей системы, о составе вулканических продуктов и об истории извержений. Эти знания позволяют строить системы аппаратного контроля (или мониторинга) вулканов.

С учетом рекреационного потенциала Приэльб-

русью развитие фундаментальных научных исследований в Эльбрусской вулканической области и совершенствование приборной базы Северо-Кавказской геофизической обсерватории, представляются первоочередными задачами, решения которых будут способствовать научному, экономическому и социальному развитию и процветанию Северо-Кавказского региона в целом.

Следует признать, читатели, что мы живем в вулканически спокойное время. Но успокаиваться пока еще рано. Выполненный объем теоретических и экспериментальных работ является лишь первым этапом начавшихся системных и систематических исследований в Эльбрусской вулканической области. Обобщение всех современных представлений об Эльбрусе выявляет не только на его способность к катастрофическим извержениям,

но и обнаруживает, что нынешний “перерыв” в извержениях не является самым продолжительным.

Вулканизм – один из основных эндогенных процессов, формирующих облик нашей планеты и информирующих нас о состоянии ее недр. Будучи экстремальным по своей сущности, этот процесс способен реализовать сценарии катастрофических событий, чреватых тяжелейшими последствиями для человечества и окружающей среды.

Мы пока не можем управлять вулканизмом – обстоятельством непреодолимой силы – поэтому необходимо непрерывно искать и совершенствовать методы предсказания вулканических извержений и землетрясений. Не касаясь других научно-прикладных проблем вулканологии, подчеркнем, что прогресс в этой области напрямую зависит от развития фундаментальных научных исследований – в первую очередь, в части изучения глубинной природы вулканических и сейсмических процессов.



## Прогноз землетрясений: проблема и пути ее решения

ЗАВЬЯЛОВ А.Д.,  
доктор физико-математических наук  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Землетрясение – как любовь, – когда оно начинается,  
никогда не знаешь, каким сильным оно будет.

*К.Г. Плетнёв, устное сообщение*

**В статье автор знакомит читателей с одним из проявлений природных катастроф – землетрясением: что это такое, как и где оно происходит; мож-**



**но ли прогнозировать землетрясения и как это делается, что надо делать, чтобы предотвратить гибель людей в результате землетрясений.**

### ЖИВАЯ ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ

Многие годы наблюдений человека за планетой, на которой он живет, привели его к мысли о том, что Земля – не мертвое, бездушное тело, а живой, развивающийся по своим законам, сложнейший организм. Незнание или игнорирование этих законов может привести

к “бунту” природы против человека и человечества. Уже в наше время мы все чаще становимся свидетелями (а, порой, и соучастниками) экологических катастроф, часто возникающих в результате конфликта человека и природы. Причина этих катастроф во многих случаях – проявление той внутренней жизни нашей

планеты, которая еще не до конца познана наукой.

По своим разрушительным последствиям, количеству жертв, материальному ущербу и деструктивному воздействию на среду обитания человека землетрясения занимают одно из первых мест в ряду других видов природных катастроф. Эти грозные явления природы

опасны не сами по себе, а потому что происходят именно там, где человек живет и работает. Исторически сложилось, что людям было удобно и экономически выгодно селиться именно там, где, как впоследствии оказалось, время от времени внезапно возникают землетрясения; этот факт приводит к еще более тяжелым, разрушительным последствиям. Разрушения, гибель людей вызывают не только собственно вибрации грунта при прохождении сейсмических волн; не менее опасны и вторичные природные явления (цунами, крип, оползни, обвалы, снежные лавины, сели), они могут активизироваться при землетрясениях. Большую опасность представляют и вторичные техногенные воздействия (и их последствия): пожары, взрывы, выбросы радиоактивных и токсичных материалов; часто именно они наносят при землетрясениях наибольший ущерб.

Вспомним катастрофические землетрясения последних лет: например, землетрясение на о-ве Суматра 26 декабря 2004 г. В результате возникновения мощного цунами (а также практически полного отсутствия службы предупреждения о его приближении) погибли около 300 тыс. человек. Приведем еще один пример – Великое японское земле-



Академик Б.Б. Голицын.

трясение, произошедшее 11 марта 2011 г.: образовавшееся цунами смыло все постройки в прибрежной зоне и затопило резервную систему электроснабжения действовавшей атомной электростанции Фукусима; по этой причине была нарушена работа системы охлаждения атомного реактора и он был остановлен. И таких примеров можно привести множество.

Стихийные явления (и землетрясения в том числе) неизбежны. Их нельзя предотвратить, но уменьшить разрушительное влияние можно и нужно. Для этого необходимо изучать процессы, связанные с готовящимся землетрясением, знать причины их возникновения, разрабатывать методы прогноза этих явлений. Но нельзя не сказать и об их позитивной роли: изучая землетрясе-

ния, наука получает бесценную информацию о процессах, происходящих в недрах Земли, недоступных человеку. По образному выражению патриарха российской сейсмологии академика Б.Б. Голицына (1862–1916): «Можно уподобить всякое землетрясение фонарю, который зажигается на короткое время и освещает нам внутренность Земли, позволяя тем самым рассмотреть то, что там происходит». Эти слова были сказаны им еще в самом начале XX в. Благодаря трудам Б.Б. Голицына наука о землетрясениях превратилась из описательной (и во многом гипотетической) в строгую научную дисциплину; полученные в результате исследований данные базируются на инструментальных наблюдениях. В некотором смысле ученые, исследующие землетрясения, а также проходящие упругих сейсмических волн в толще земных недр, похожи на медиков, получающих информацию об устройстве живых существ, проводя исследование их внутренних органов.

ЧТО МЫ ЗНАЕМ  
О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ?

Землетрясение – слово русское, поэтому смысл его ясен: это “трясение” земли; точное научное определение этого явления – колебания земной поверх-



Схема, поясняющая положение эпицентра и гипоцентра (очага) землетрясения. Инфографика РИА-Новости.

землетрясений с магнитудой  $M \geq 7,0$ ; 93 из них имели магнитуду, равную и более 8,0. Заметим, что самое сильное землетрясение на нашей планете, зарегистрированное с помощью приборов (то есть инструментально) имело магнитуду  $M = 9,5$ . Это – Великое чилийское землетрясение, произошедшее 22 мая 1960 г.

Людские потери от землетрясений, зафиксированных в период с 1970 по 2017 гг., составили около 1,8 млн человек (около 37,4 тыс. человек в год).

В Российской Федерации около 28% всей территории является сейсмоопасными зонами; здесь возможны сейсмические сотрясения с интенсивностью 7 и более баллов по макросейсмической шкале MSK-64<sup>1</sup>. На этой территории проживает более 19% всего населения страны, расположены тысячи больших и малых городов и поселков, десятки крупных гидро- и тепловых электростанций, атомных электростанций и большое количество предприятий, производст-

ности при прохождении волн от источника, находящегося внутри Земли. По-гречески землетрясение –  $\sigma\epsilon\iota\sigma\mu\acute{o}\varsigma$  (сейсмоз), отсюда и название направления в геофизике – сейсмология – наука, изучающая землетрясения, их природу, закономерности распространения.

Кажется, что землетрясения – это зло, страшное бедствие для человечества и с ним надо бороться. На что же будет указывать отсутствие землетрясений? По-видимому, это будет означать, что наша планета Земля стала холодным безжизненным телом, на котором людям уже не будет уютно и тепло, поэтому придется ис-

кать другой космический дом. С другой стороны, следуя Б.Б. Голицыну, землетрясения – естественный, бесплатный источник сейсмических волн, которые пронизывают нашу планету и приносят информацию об ее внутреннем устройстве; это свойство землетрясений широко используют ученые-сейсмологи для изучения внутреннего устройства нашей планеты.

Землетрясения составляют около 13% от общего числа природных катастроф, происходящих на нашей планете, занимая третье место. По данным Национального центра информации о землетрясениях США, с 1900 по 2017 гг. на Земле произошло 1346

<sup>1</sup> Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных районах / Под ред. Уломова В.И. и Богданова М.И. // Инженерные изыскания в строительстве, 2016. № 7. С. 49–121.

ва которых представляют повышенную экологическую опасность. Однако и менее сильные продолжительные низкочастотные 4–5-балльные сотрясения, например, в Восточных Карпатах (распространяются на огромные расстояния от заглубленных очагов крупных землетрясений) способны нанести урон чувствительным к таким колебаниям уникальным высотным строительным объектам даже на большом удалении от эпицентров (в том числе на территории Москвы и Московской области). Примером такого воздействия стало мощное глубокофокусное землетрясение, произошедшее в Охотском море 24 мая 2013 г. с магнитудой  $M=8,2$ : сотрясения, вызванные сейсмическими волнами от этого землетрясения, ощущались на всей огромной территории России; они докатились и до Москвы (расстояние от эпицентра – порядка 6000 км)<sup>2</sup>.

#### ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ЭКОНОМИКУ И ОБЩЕСТВО

Сейсмическая опасность на Земле увеличивается с каждым годом, этот процесс находится в прямой зависимости от хозяйст-

венного освоения человеком сейсмоопасных территорий и активного воздействия на литосферную оболочку нашей планеты (например, добыча нефти, газа и других полезных ископаемых, строительство крупных гидротехнических сооружений; процесс захоронения промышленных отходов). Следует учесть, что с ростом урбанизации и усилением индустриальной нагрузки на определенную территорию нарастают и потери от землетрясений.

Наука не может пока предсказать время, место и разрушительную силу землетрясения с точностью, достаточной для экономически и социально оправданной экстренной остановки потенциально опасных производств и эвакуации населения. Однако с вероятностью до 70% специалисты могут указать место предполагаемого (потенциального) очага и магнитуду будущего сильного землетрясения с опережением (от 1 до 5 лет; среднесрочный прогноз). Это дает возможность федеральным и региональным властям, структурам Министерства по чрезвычайным ситуациям заранее время для того, чтобы максимально подгото-

виться (противостоять) возможной катастрофе.

Так, в Российской Федерации, основываясь на долгосрочных прогнозах академика С.А. Федотова, выполненными ученым для территорий Камчатки и Курильских островов, принята и реализуется программа по сейсмическому укреплению жилого фонда г. Петропавловска-Камчатского.

Что же является причиной землетрясений? По современным представлениям, землетрясение есть следствие разрыва горных пород (образования гигантских трещин) в глубинах земных недр. Этот разрыв распространяется (или, как говорят, прорастает) со скоростью несколько километров в секунду, а его “берега” при этом излучают упругие волны. Они достигают земной поверхности за несколько секунд, что и вызывает при сильных землетрясениях разрушение зданий и сооружений, приводит к гибели людей.

#### НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Прогноз землетрясений – сложная научная проблема и благородная цель, которой служит сейсмология. Точно предсказать время возникновения оче-

<sup>2</sup>Рогожин Е.А., Завьялов А.Д., Зайцева Н.В. Макросейсмические проявления Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. на территории г. Москвы // Вопросы инженерной сейсмологии, 2013. Т. 40. № 3. С. 64–77.

Жигалин А.Д., Завьялов А.Д., Миндель И.Г. и др. Феномен Охотскоморского землетрясения 24 мая 2013 г. в Москве // Вестник РАН, 2014. Т. 84. № 7. С. 601–609.

редных сейсмических толчков (а, тем более, предотвратить их), к сожалению, невозможно. Однако количество разрушений и человеческих жертв могут быть уменьшены путем проведения в сейсмоактивных районах разумной и долговременной государственной политики: в ее основе – повышение уровня осведомленности населения и федеральных органов об угрозе землетрясения и их умении противостоять подземной стихии. Известно, что выполнение упредительных мероприятий обходится государству во много раз дешевле, чем проведение аварийно-спасательных работ в процессе ликвидации последствий стихии, а также возмещение ущерба, вызванного чрезвычайной ситуацией.

Начало широкомасштабных исследований по проблеме прогноза землетрясений относится к середине 1950-х гг. В этот период получили мощное развитие национальные системы сейсмологических и геофизических наблюдений, нацеленные на прогноз сильных землетрясений. К примеру, в СССР были организованы прогностические полигоны в Гарме (Памир, Таджикистан) и на Камчатке. В течение первых 10–15 лет инструментальных наблюдений были зафиксированы и изучены десятки различных явлений – “пред-

вестников” землетрясений. Однако, как правило, это были единичные сообщения и о подавляющем большинстве предвестников не было данных (об их прогностической эффективности).

Значительными вехами в изучении физики очага землетрясения и выявления его прогностических признаков разного генезиса (например, эмиссия радона, деформация земной поверхности) послужили исследования природы разрушительного Ташкентского землетрясения 1966 г. Они были закреплены на I Международном симпозиуме по прогнозу землетрясений, состоявшемся в Ташкенте в 1974 г. под эгидой Международной ассоциации по сейсмологии и физике недр Земли.

Первый и весьма обнадеживающий прогноз сильного землетрясения относится к середине 1970-х гг.; в этот период (июнь 1974 г. – январь 1975 г.) китайские ученые, проанализировав данные наблюдений за различными геофизическими полями, сумели за несколько дней до произошедшего затем Хайченского землетрясения (4 февраля 1975 г.;  $M = 7,3$ ) сообщить о его прогнозе властям провинции Хэбэй (северо-восточный Китай). В результате в считанные часы было эвакуировано население г. Хайчен. Предсказанное землетрясение произошло, но экономический и социальный

ущерб от него был минимизирован. Это землетрясение сейчас часто приводится в качестве классического примера успешного прогноза с использованием комплекса предвестников: в этом районе наблюдали изменения некоторых параметров сейсмического режима – характеристик слабых землетрясений; было отмечено аномальное поведение змей – они выползали из своих норок, несмотря на то, что это был февраль (холодное время), аномально изменялся уровень воды в скважинах.

Этот успех породил волну надежд на быстрое решение проблемы прогноза землетрясений. Казалось, что проблема прогноза землетрясений решена.

Однако, эти надежды не оправдались. Чуть больше года спустя, 28 июля 1976 г., в том же Китае (в 200–300 км к востоку от Пекина) произошло Таншаньское землетрясение ( $M = 7,9$ ), которое целиком разрушило г. Таншань (с миллионным населением) и унесло жизни более 240 тыс. человек. Здесь так же наблюдались многочисленные предвестники, однако отсутствие на тот момент достаточных статистических данных об их достоверности и эффективности не дало возможности объявить тревогу. По образному выражению китайских сейсмологов, день Таншаньского землетрясения стал кош-



*Разрушенный землетрясением г. Таншань (Китай), 28 июля 1976 г.*

маром для сейсмологии и человеческой цивилизации.

Тем не менее в течение 20-ти последующих лет как снежный ком нарастало число публикаций о зарегистрированных предвестниках землетрясений в разных странах. Специалисты разработали модели подготовки землетрясений, претендующие на объяснение природы “предвестников”. Наиболее популярными из них стали дилатантно-диффузная модель (существенная роль отводится внутривещным флюидам) и модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (упор делался на накопление трещин и их взаимодействие при достижении критических величин их объемной плотности). Быстро разрастались системы прогностических наблюдений. Большое развитие получили методы регистрации вариаций наклонов и деформаций земной поверхности; уровня и химического состава подземных вод; электросопротивления магнитных и электрических полей; геохимических параметров. Комплексность и широта наблюдений позволили выявить ранее ма-



лоизвестные особенности аномальных изменений геофизических полей, интерпретируемых как “предвестники”. К главным относятся: “пятнистость” проявления аномалий по площади, размеры которой во много раз превышают длину разрыва от соответствующего землетрясения; разнообразие форм проявления аномалий от места к месту и от землетрясения к землетрясению. Среди исследователей постепенно сформировалось обоснованное мнение о том, что источником большинства аномалий не является очаг будущего землетрясения; особенно это относится к краткосрочным предвестникам, появляющимся за несколько суток (или часов) до землетрясения<sup>3</sup>.

После Таншаньского землетрясения и неудавшегося многолетнего экспери-

мента по прогнозу землетрясения в Паркфилде (штат Калифорния, США) в середине 1980-х гг. в прогностических исследованиях наступил период “отлива” и скептического отношения к возможности решения этой проблемы. В научной печати разгорелась дискуссия о принципиальной возможности прогноза землетрясений. Сторонники невозможности прогноза указывали на хаотичность сейсмического процесса в сложно построенной земной коре; высокую вероятность динамического развития любой трещины – до разрыва большого землетрясения; трудно учитываемое триггерное, подобное “спусковому механизму”, влияние малых внешних возмущений, которые могут привести (а могут и не привести) к макронеустойчивости сейсмоактивного района,

<sup>3</sup> *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений/ М. : Наука, 1993. 313 с.

*Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники/ М. : Наука, 2003. 270 с.

находящегося в метастабильном состоянии. Более оптимистично настроенные исследователи основывались на экспериментально установленных фактах возникновения предвестников в очаге будущего землетрясения, а также на вероятностном прогнозе катастрофы в условиях детерминированного хаоса. Тем не менее большинство исследователей в разных странах были согласны с тем, что прогресс возможен при условии накопления новых, более обширных и глубоких знаний о многообразных физических процессах, приводящих к землетрясению. Возможно, не последнюю роль в этом сыграло катастрофическое Спитакское землетрясение в Армении, произошедшее 7 декабря 1988 г., – в СССР (а затем – в Российской Федерации) в течение нескольких лет наблюдалось повышенное внимание руководителей страны к проблеме сейсмической опасности.

Более чем двадцатилетняя дискуссия о возможности (или невозможности) прогноза землетрясений завершилась, по-видимому, на 35-ой Генеральной ассамблее Международной ассоциации по сейсмологии и физике недр Земли, проходившей в Кейптауне (Южная Африка) в январе 2009 г., была принята специальная резолюция, подводившая итог представленных

исследований по прогнозу и предсказуемости землетрясений. В ней записано, что «...осознавая возможности, которые предоставляют недавние события в изучении землетрясений, Международная ассоциация по сейсмологии и физике недр Земли рекомендует, чтобы исследования по прогнозу и предсказуемости землетрясений, их аттестации и сравнительному испытанию методов прогноза поддерживались (*научным сообществом*)».

Очевидна важность и актуальность решения задачи прогнозирования землетрясений как части более общей проблемы – уменьшения опасности, сопровождающей природные катаклизмы, и экономических последствий в обществе от их воздействия. Указом Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011 г. создание новых методов предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера вошло в Перечень критических технологий Российской Федерации.

ЧТО ТАКОЕ  
ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ?

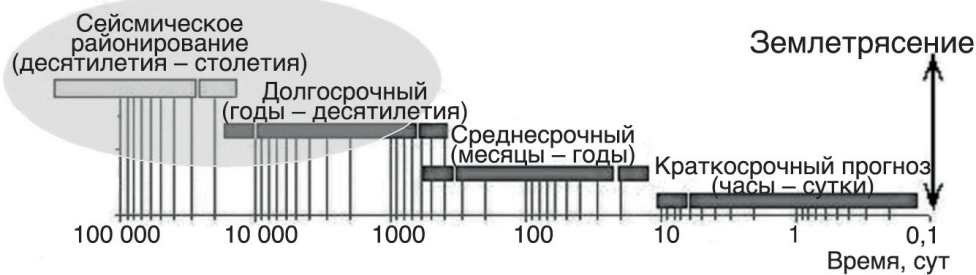
Информация о прогнозе землетрясения должна определять ожидаемый магнитудный диапазон; географическую область, где оно произойдет, и интер-

вал времени, когда оно может случиться с точностью, достаточной для того, чтобы суждение об окончательном успехе (или неудаче) прогноза не вызывало затруднений. Сверх того, ученым следует также определить “доверительный” уровень каждого прогноза. Таким образом, прогноз землетрясения включает три элемента: определение его места, времени и силы (магнитуды).

Для того чтобы узнать место землетрясения, надо иметь сеть наблюдений по площади, которую, прежде всего, создает сейсмическая сеть. Наблюдения за другими геофизическими предвестниками: электрическим сопротивлением, наклонами земной поверхности, ее деформацией, химическим составом подземных вод ведутся, к сожалению, только в отдельных точках сейсмоактивных районов. Какова зона ответственности каждой такой точки наблюдений – оценить очень трудно? Именно поэтому в середине 1980-х гг. в СССР была разработана целевая Программа по созданию сети сейсмических наблюдений для прогноза землетрясений. В ней, в частности, говорилось, что для прогноза землетрясений с магнитудой 5–5,5 и выше (они дают социально значимый эффект – разрушения, гибель людей, разрывы тру-

## "КЛИМАТ" Прогноз места и силы

## "ПОГОДА" Прогноз места, времени и силы



Типы прогноза землетрясений.

бопроводов) надо иметь сеть наблюдений по всем признакам, распределенную по сетке в масштабе  $50 \times 50$  км. Как уже было отмечено, площадь, составляющая около 28% общей территории РФ, подвержена сейсмической опасности. Для того чтобы "покрыть" эту территорию станциями наблюдений за предвестниками землетрясений (по сетке  $50 \times 50$  км), потребуются огромные материальные затраты.

Во временных рамках прогноз подразделяется на долгосрочный (на десятилетия вперед), среднесрочный (годы), краткосрочный (дни-месяцы) и оперативный (минуты-часы). Следует заметить, что деление это условное. Каждый период прогноза базируется на определенном наборе предвестников геофизических явлений (в основном), опережающих и предвещающих возникновение землетрясения.

Сейсмическое районирование, например, можно сравнить с определением сейсмического климата:

- районы, наиболее подверженные сейсмической опасности, – сейсмические пояса Земли (это сейсмический "юг", там "жарко");
- районы, где сейсмичность отсутствует или незначительна (это сейсмический "север").

### О ПРЕДВЕСТНИКАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Прогнозирование ведется по отслеживанию "предвестников" – симптомов, признаков, указывающих на то, что, возможно, в таком-то месте и в такое-то время произойдет сейсмическое событие. К настоящему времени во всем мире насчитывается несколько сотен различных по своей природе предвестников землетрясений, их можно разделить на две группы.

Первая, наиболее многочисленная и наиболее изученная группа – геофизические "предвестники", связанные с закономерным поведением геофизических полей на разных этапах готовящегося землетрясения. Предвестники этой группы присутствуют практически во всех диапазонах прогноза по времени: от долгосрочного до оперативного.

Вторая группа связана с необычным поведением биологических объектов перед землетрясением. Известно, что поведение животных, птиц, рыб, змей и других биологических объектов меняется перед сильным сейсмическим событием. Эта группа предвестников менее изучена; их можно отнести краткосрочным и оперативным. В свою очередь, геофизические "предвестники" делятся на сейсмические, гидрогеодинамические, деформационные, геохимические, термические, гравитационные, электромагнитные.



### Группы предвестников землетрясений.

совместное использование нескольких прогностических признаков; при этом исходят из того, что каждый отдельный “предвестник” отражает ту или иную сторону многогранного (и не до конца ясно) процесса готовящегося землетрясения и не является достаточно информативным, с точки зрения статистики. Поэтому их комплексное использование позволяет повысить надежность и эффективность прогнозных оценок.

Практика последних лет показала оправданность такого подхода, по крайней мере, для среднесрочного (в первые годы) прогноза. Примером успешного прогноза сильного землетрясения с использованием комплекса прогностических признаков и методов служит Симуширское (Средне-Курильское) землетрясение, произошедшее 15 ноября 2006 года.

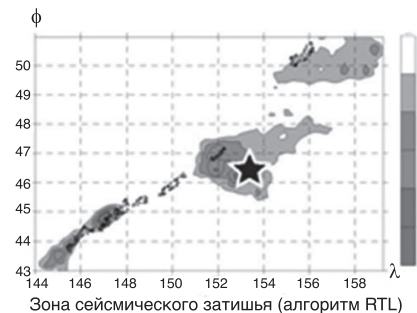
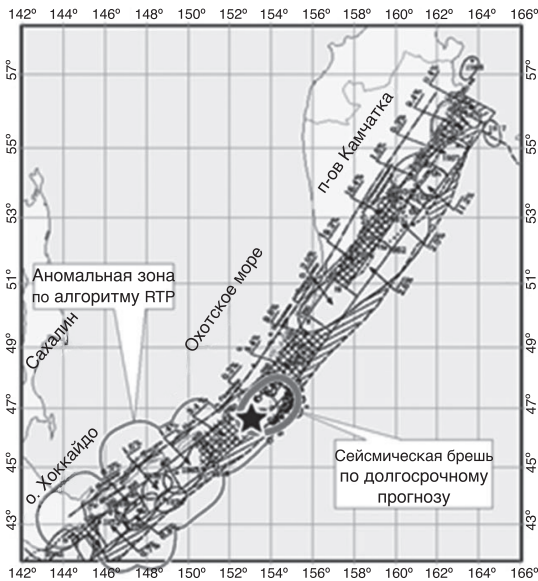
Какими же должны быть наблюдаемые явления, чтобы их можно было бы рассматривать в качестве предвестников землетрясений? Вот они:

- Ясный физический смысл прогностических признаков;
- физическая обоснованность связи каждого прогностического признака с процессом “подготовки” землетрясений;

Несмотря на огромное количество предвестников, ни один из них не дает точных указаний на время, место и силу грядущего землетрясения. В разных сейсмоактивных районах различные предвестники проявляют себя по-разному, создавая большой разброс в оценке места, времени и силы будущего землетрясения. Это связано не только со сложностью самого объекта исследований (очага землетрясения, условий его зарождения и развития; отсутствием количественной теории процесса “подготовки” землетрясения), но и с существенным влиянием помех: их далеко не всегда удается исключить. Поэтому прогноз землетрясений (как и прогноз погоды) имеет вероят-

ностный характер. Следует также заметить, что сообщения о наблюдавшихся предвестниках землетрясений являются, по большей части, единичными, и по ним затруднительно (а порой и невозможно) оценить даже ретроспективно их статистические характеристики: вероятность правильного прогноза, вероятность ложной тревоги, среднее время ожидания землетрясения после появления “предвестника”.

Анализ многолетних данных по ряду геофизических (в основном сейсмологических) “предвестников” показал, что вероятность успешного прогноза по каждому из них не превышает 50%. Одним из возможных выходов из этой ситуации является



Долгосрочный и среднесрочный прогнозы Симуширского (Средне-Курильского) землетрясения, произошедшего 15 ноября 2006 г.,  $M=8,2$ . Слева – карта долгосрочного прогноза с использованием различных методов; справа – график (вверху) и зоны сейсмического затишья (внизу), в соответствии с прогнозом. Звездочками показано положение эпицентра землетрясения: оно произошло в выделенных по проявлениям “предвестников” в аномальных зонах. (Из доклада президента РАН академика Ю.С. Осипова на общем собрании РАН 28 марта 2007 г.)

– подкрепленность каждого прогностического признака данными наблюдений как во времени (долговременные ряды значений прогностических признаков), так и в пространстве (возможность их картирования);

– наличие формализованной процедуры выделения аномалий прогностических признаков, основанной на модели их поведения в период “подготовки” землетрясения;

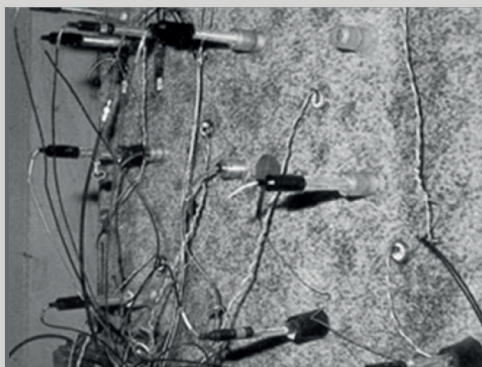
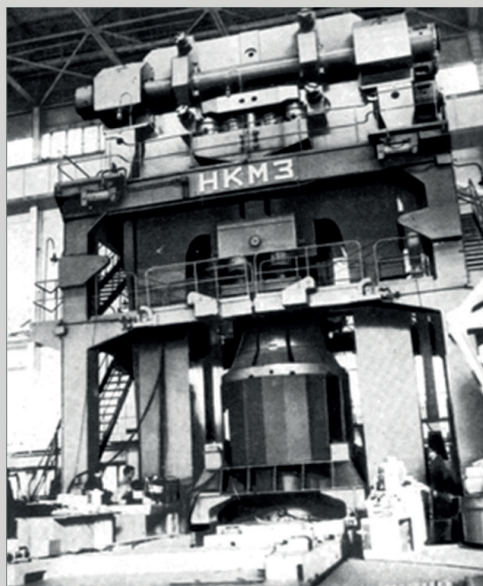
– возможность оценки ретроспективных (по результатам предшествую-

щих наблюдений) статистических характеристик каждого “предвестника”: вероятности успешных прогнозов (вероятности обнаружения), вероятности ложных тревог, прогностической эффективности (информативности).

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Помимо наблюдений за изменениями разных геофизических полей в натурных (или в полевых условиях), ученые широко используют для изучения

процесса формирования очага будущего землетрясения прием лабораторного моделирования. В качестве моделей сред, в которых “готовится” землетрясение, при этом используются образцы горных пород различного происхождения, обладающие различными физическими свойствами, а также искусственные модельные материалы: чаще всего цемент с различными наполнителями в виде песка, гранитной крошки различного гранулометрического состава. Роль машины,



*Подготовка образца к эксперименту по моделированию очага землетрясения на Большом прессе (осевое усилие – 50 тыс. т) в Институте физики высоких давлений РАН (Троицк, 1985 г.). Справа вверху – одна из граней испытуемого образца с наклеенными датчиками; внизу – общий вид образца, подготовленного к эксперименту. Фото Г.А. Соболева.*

создающей условия, существующие в глубине земных недр, в этих случаях выполняет механический пресс с обратной связью. С его помощью можно давать на образец одно-, двух- и трехосную нагрузку. В некоторых экспериментах для приближения к условиям, в которых горные породы находятся в земных недрах, вокруг исследуемого образца, помещенного в специальное устройство (“бомбу”), создается всестороннее давление.

Основываясь на результатах многолетних наблю-

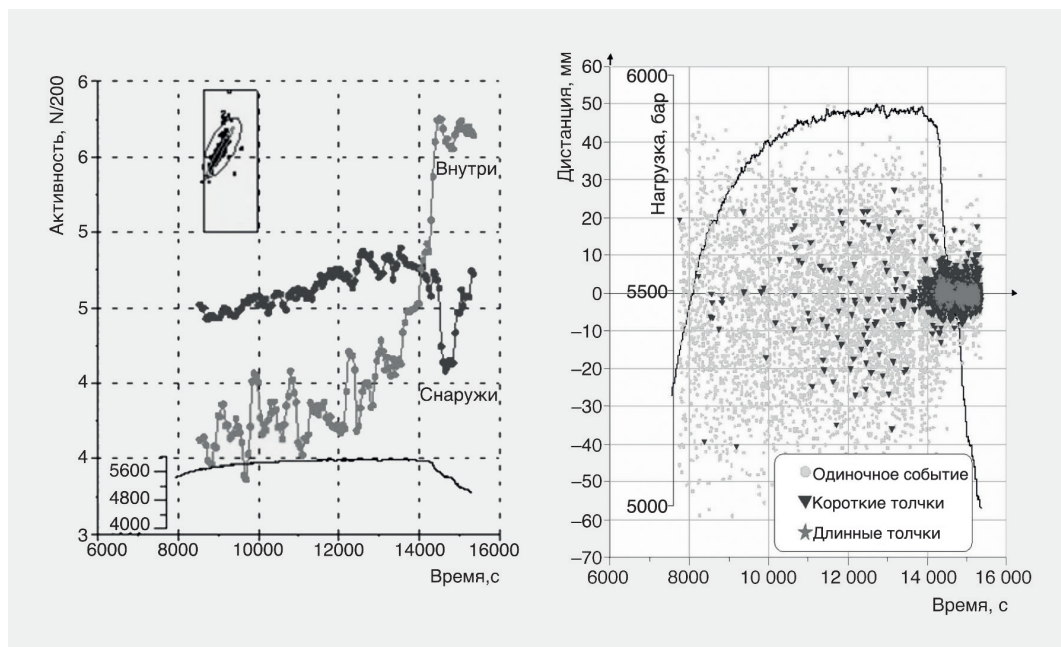
дений за сейсмической активностью и на лабораторных экспериментах, член-корреспондент РАН Г.А. Соболев предложил концепцию прогноза землетрясений. Согласно этой концепции, будущее землетрясение в процессе “подготовки” проходит ряд последовательных стадий, развивающихся в пространстве и во времени, каждой из которых присущи свои черты и характерные признаки условий, при которых может произойти землетрясение.

#### ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Какие же трудности выделяют ученые, занимающиеся прогнозом землетрясений? Их, как минимум, две.

Первая: сейсмичность – одна из разновидностей процессов, протекающих в неравновесных системах (а земные недра – это неравновесная система). Отсюда следует неоднозначность прогноза катастрофы.

Вторая: неоднородность напряженного состояния



*Результаты лабораторных экспериментов по моделированию очага землетрясения. Графики изменения акустической эмиссии во времени и в объеме образца: слева – к моменту его разрушения акустическая активность разная: вблизи зоны будущего разрыва (очага землетрясения; кривая в центре) и вне ее (кривая, идущая сверху вниз); справа – ближе к моменту разрушения увеличивается количество групповых акустических событий (темные треугольники и звездочки), тяготеющих к зоне разрыва. По данным Г.А. Соболева, А.В. Пономарева, (2003 г.)*

и прочности в литосфере приводит к одновременному существованию многих метастабильных областей, в каждой из которых может произойти землетрясение; но время возникновения землетрясения определяется малыми воздействиями разных физических полей (триггерами). Отсюда неизбежен пропуск целей и невысокая вероятность успешного краткосрочного прогноза.

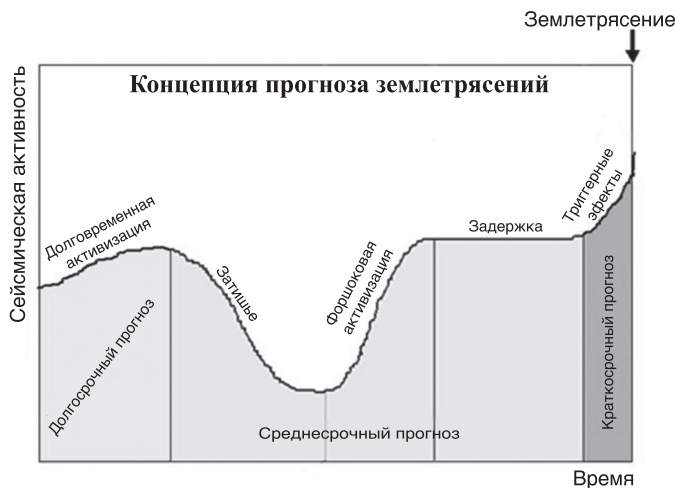
Так можем ли мы прогнозировать землетрясения? Отвечая на этот вопрос, можно пойти двумя путями. Первый: поскольку

наши знания о процессах, предшествующих возникновению землетрясения еще неполны и недостаточно адекватно его отражают, то землетрясения предсказывать мы не можем. Надо дождаться того момента, когда эти знания станут полными и только тогда приступить к действительным прогнозам землетрясений.

Второй путь: при накопленном в настоящее время объеме знаний о процессе “подготовки” землетрясения, условиях, предшествующих его возникновению и известных “пред-

вестниках” и алгоритмах прогноза, все же пытаться делать такие прогнозы, получая таким образом новые знания и накапливая опыт прогнозов. Автор придерживается второго пути.

Из этого вытекает вывод: с целью накопления опыта мы уже сейчас можем перейти от описания отдельных “предвестников” к систематическому научному прогнозу сильных землетрясений ( $M \geq 5,5$ ) с использованием комплекса прогностических, физически обоснованных признаков и соответствующих методик.



Концепция прогноза землетрясений, по Г.А. Соболеву. Будущее землетрясение в процессе “подготовки” проходит ряд последовательных стадий, развивающихся в пространстве и во времени, каждой из которых присущи свои черты и характерные признаки.

падных специалистов, показывающие, что число погибших в результате землетрясений выше в тех странах, где высока коррупция в строительной отрасли<sup>5</sup>. Из всех смертельных исходов при землетрясениях, связанных с разрушением зданий за последние три десятилетия (с 1980 по 2010 гг.), 82,6% зафиксировано в государствах, в которых высок уровень коррупции.

## О КАЧЕСТВЕ СТРОИТЕЛЬСТВА

Теперь давайте зададимся вопросом, что важнее: спрогнозировать сильное землетрясение или хорошо и качественно построить здание (с учетом силы ожидаемых сейсмических воздействий)? Среди сейсмологов бытует выражение: “Не землетрясения убивают людей, а здания”. Прогнозировать землетрясения мы не научимся

еще очень долго – надо просто хорошо строить. “Жизненно важно не предсказать точное время, когда будет разрушен город, а построить его там и так, чтобы он не был разрушен”<sup>4</sup>.

И снова зададимся вопросом: что мешает качественному строительству? Известны исследования за-

Обрушение недостроенного 13-этажного здания в Шанхае (Китай). Следует обратить внимание на то, что при обвале здание не рассыпалось на составные элементы (как это бывает при низком качестве строительства), а осталось целым. Фото информгентства “Синьхуа”, 27 июня 2009 г.

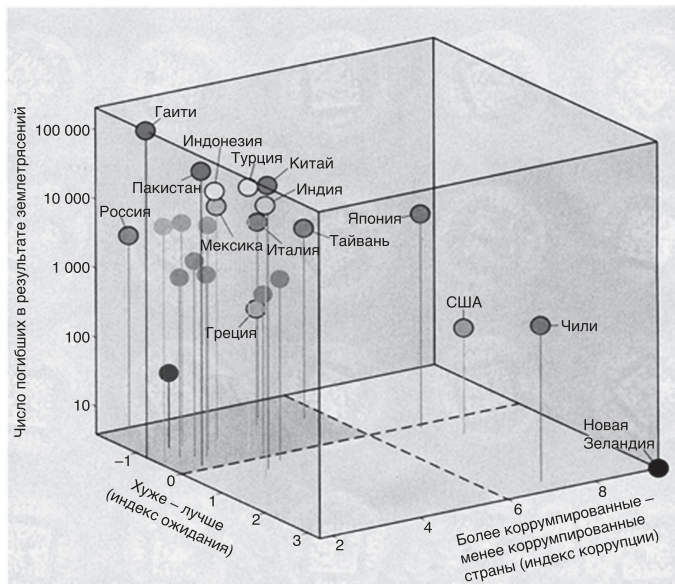


<sup>4</sup>Солоненко В.П. Сейсмология и проблемы предсказания землетрясений // Геология и геофизика, 1974. № 5. С. 168–178.

<sup>5</sup>Ambraseys N., Bilham R. Corruption kills // Nature, 2011. V. 469. P. 153–155.



Гистограмма, на которой отражена связь уровня коррупции в строительной отрасли в указанных странах с количеством погибших в результате землетрясений. В левой угловой части рисунка обозначены наиболее коррумпированные страны. По данным Ambraseys, Bilham, 2011 г.



Итак, проблема прогноза землетрясений (несмотря на положительные результаты, полученные в последние десятилетия) еще очень далека от своего решения. Вполне вероятно, что надежные и полезные прогнозы не появятся еще много лет – настолько сложна эта задача, требующая больших сил и средств; даже в самых развитых странах их недостаточно. С другой стороны – успешные прогнозы не избавят человечество от землетрясений, они будут причинять ущерб зданиям и сооружениям. Кроме того, даже в случае надежного прогноза можно ли будет осуществить полную эвакуацию населения таких мегаполисов как Токио, Сан-Франциско, Пекин?

Эффективным способом борьбы с разрушительными эффектами, сопровождающимися землетрясениями, должно быть сейсмостойкое строительство новых объектов и укрепление старых зданий до такой степени, чтобы они смогли выдерживать натиск стихии.

Хотя, как показывает печальный опыт землетрясения, произошедшего 16 января 1995 года в г. Кобэ (Япония), даже высокий уровень антисейсмического строительства не способен полностью избавить современный город от огромных прямых и косвенных потерь.

нужно ли ПРОГНОЗИРОВАТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ?

Правомерен вопрос: для чего тогда нужно вооб-

ще прогнозировать землетрясения? Общество (а конкретный человек – тем более) не может жить и быть постоянно готовым к землетрясению: со временем чувство опасности притупляется. И тогда действительный, статистически оправданный прогноз будет сигналом к приведению в повышенную готовность отрядов спасателей; отключению газо- и нефтепроводов; остановке экологически вредных производств, находящихся на опасной территории. Выполнение этих и других организационно-технических мероприятий позволит снизить прямые и косвенные убытки в том случае, если землетрясение произойдет.

### КТХ: галактическое скопление

В мае 2018 г. с помощью Космического телескопа им. Хаббла получено изображение Сверхскопления Девы (Virgo Supercluster), на заднем плане которого находится скопление галактик SDSS J0333+0651 (см. стр. 4 обложки). Оно получено в рамках обзора, целью которого было исследование процессов звездообразования в протяженных галактиках. Области рождения новых звезд, как правило, – не очень большие: они составляют всего несколько сотен световых лет, поэтому новые звезды трудно обнаружить на больших расстояниях от Земли за счет гравитационных линз. Древние скопления – такие, как это: образовавшиеся в первые сотни миллионов лет после Большого взрыва – могут помочь астрономам больше узнать о начальных этапах эволюции Вселенной.

Известно, что галактики в космическом пространстве не распределяются случайным образом, а собираются вместе в группы под действием гравитации. Например, Млечный Путь является

членом Местного Скопления галактик (Local Group), входящего в Сверхскопление Девы (Virgo Supercluster), которое, в свою очередь, представляет собой часть другого гигантского образования, содержащего до 100 тыс. галактик – сверхскопления Ланиакея (Laniakea) размером 520 млн св. лет и массой  $10^{21} M_{\odot}$  (находящееся на расстоянии 160 Мпк от нас). Недавнее открытие огромного образования Ланиакея (в переводе с гавайского "необъятные небеса") позволило точно определить границы нашей Местной группы галактик, а также установить не понятные ранее взаимосвязи между различными скоплениями галактик.

Сверхскопления галактик являются самыми большими структурами во Вселенной; они составлены из галактических групп, подобных нашей, Местной группе, содержащей десятки различных галактик, а также массивных скоплений; они, в свою очередь, содержат сотни галактик, связанных друг с другом галактическими "нитеями" (филаментами). И, хотя эти структуры связаны друг с другом, но их границы плохо устанавливаются. Для того, чтобы лучше понять распределение сверхскоплений в космическом пространстве, ученые предложили новый способ оценки этих крупно-

масштабных структур – он основывается на их влиянии на движение галактик: галактика, находящаяся между двумя сверхструктурами, является космическим "канатом", перетягивающим к себе сверхскопления. В связи с этим баланс гравитационных сил от окружающих крупномасштабных структур будет полностью определять движение этой галактики. С помощью радиотелескопа Грин-Бэнк Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO, США) и других наземных астрономических инструментов была создана Карта скоростей движения галактик местной Вселенной. Астрофизики смогли определить области пространства, в которых доминирует та или иная группа сверхскоплений. Это исследование так же объясняет роль Великого аттрактора (Great Attractor) – гравитационного центра притяжения в межгалактическом пространстве; оно влияет на движение Местной группы и других галактических групп. Определено, что Великий аттрактор и Сверхскопление Девы входят в Сверхскопление Ланиакея.

*Пресс-релиз  
ESA/STScI и NASA,  
25 мая 2018 г.*



## Ионосферный след от землетрясений и цунами

С.Л. ШАЛИМОВ,  
доктор физико-математических наук  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**Диагностика внешних оболочек Земли, осуществляемая посредством глобальных навигационных спутниковых систем и не менее глобальной сети наземных приемников и передатчиков в сверхдлинно-**



**волновом радиодиапазоне, позволяет исследовать достаточно сложные процессы литосферно-ионосферных связей, например, воздействия землетрясений и цунами на ионосферу.**

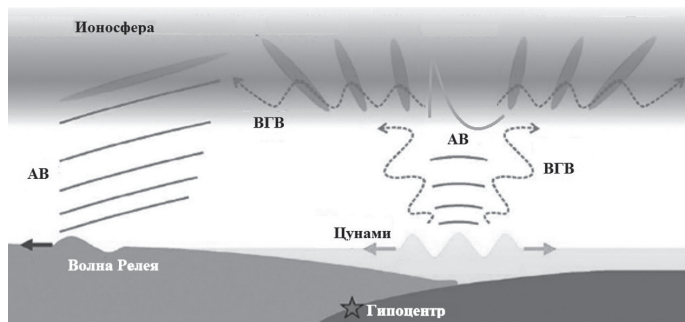
ВОЛНЫ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ

В настоящее время дистанционная диагностика внешних оболочек Земли, осуществляемая посредством глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС вместе с широко разветвленной сетью их наземных приемных станций (около 2500 пунктов; но сеть постоянно развивается), а также не менее глобальная сеть наземных приемников и передатчиков

в сверхдлинноволновом радиодиапазоне позволяют исследовать сложные процессы их взаимного влияния. Такая диагностика применяется и в исследованиях литосферно-ионосферных связей. Яркий пример такого исследования – выявление воздействия землетрясений и цунами на ионосферу.

Очаг сильного землетрясения – это довольно мощный источник сейсмических волн; нас будут интересовать сейсмические по-

верхностные волны Релея (распространяются вблизи границы литосферы), включающие вертикальные движения на границе земной поверхности и атмосферы. Поверхностные волны, возбуждаемые при землетрясениях, имеют длины от десятков до многих сотен километров; их фазовая скорость – от 3 до 4 км в секунду; вертикальные смещения почвы достигают нескольких сантиметров. Волны Релея, как и подвижки по линии



Общая схема возбуждения и распространения сейсмических волн Релея в процессе прохождения цунами, а также атмосферных акустических (АВ) и внутренних гравитационных (ВГВ) волн.

разлома земной коры в эпицентре землетрясения приводят к непосредственному воздействию на атмосферу – излучению атмосферных волн.

В отличие от землетрясений с эпицентром на суше аналогичные события на дне океана имеют особенность: они вызывают сейсмические волны не только в земной коре, но и в толще океана (включая разрушительные по воздействиям на инфраструктуру цунами). Эти длинные волны относят к гравитационным поверхностным волнам. Характерная длительность цунами (их период) составляет несколько десятков минут; длины этих волн – несколько сотен километров, скорость их распространения – порядка 200 м/с. Высота волн достигает нескольких метров в океане и нескольких десятков метров по мере приближения к берегу.

Наличие у Земли собственного гравитационного поля (с ускорением свободного падения  $g$ ), а также способность земной

атмосферы сжиматься создают квазигидростатическое падение плотности атмосферы, с ростом высоты над Землей, называемое стратификацией. Основные типы колебаний такой изотермической атмосферы над плоской землей (без учета ее вращения) таковы: двумерные волны (волны Лэмба); внутренние акустические и внутренние гравитационные волны. Возвращающая сила в продольных акустических волнах – сила упругости, а в вертикально-поперечных гравитационных волнах – сила тяжести (этим обусловлен “запрет” на вертикальное распространение этих волн). Стратификация ограничивает распространение (со скоростью звука) волн Лэмба в горизонтальном направлении и приводит к быстрому (по экспоненте) убыванию их энергии, с удалением от земной поверхности.

Простейшая модель, предложенная еще в 1967 г. сотрудниками ИФА РАН академиком Г.С. Голицыным и доктором физи-

ко-математических наук В.И. Клячкиным позволяет установить возможные частоты атмосферных волн, возбуждаемые сейсмическими возмущениями, распространяющимися вдоль поверхности земли и океана, а также условия их излучения.

Сейсмические поверхностные волны Релея, скорости которых велики по сравнению со скоростью звука в атмосфере, могут излучать акустические волны. Задача о генерации горизонтально распространяющейся сейсмической волной акустической волны в атмосфере аналогична задаче о генерации электромагнитных волн в среде заряженной частицей, движущейся со скоростью больше фазовой скорости света в среде (эффект Вавилова–Черенкова). Угол, под которым при этом генерируется атмосферная акустическая волна, оценивается из дисперсионного уравнения для атмосферных волн соотношением  $\cos\varphi \sim 1/M$ , где  $M$  – число Маха, равное отношению скорости сейсмической волны к скорости звука.

Морские же волны излучать акустические волны не могут, так как скорость первых гораздо меньше скорости последних. Однако для возбуждения атмосферных внутренних волн необходимо, чтобы их горизонтальная фазовая скорость превышала скорость морских волн на поверхности. Это имеет место только для длинных поверхностных гравитационных волн, к которым относят цунами. Частота атмосферных волн  $\omega$  может быть разной: от близкой к нулю (когда волновой вектор близок к вертикальному) до  $\omega_{gr}$ , называемой частотой Брента-Вяйсяля (когда волновой вектор почти горизонтален). Поскольку групповая скорость в этих волнах перпендикулярна фазовой, то энергия волн распространяется под прямым углом к направлению распространения волнового фронта. Самую быструю групповую скорость имеют низкочастотные волны ( $\omega \approx 0$ , волновой вектор почти вертикален), причем она направлена практически горизонтально. Такие волновые структуры очень эффективны в распространении энергии по горизонтали.

После генерации в атмосфере акустико-гравитационные волны могут распространяться до высот ионосферы, где посредством столкновений нейтральных и заряжен-

ных частиц приводят в движение ионосферную плазму. Поскольку плотность атмосферы быстро (практически по экспоненте) уменьшается с высотой, то, при сохранении энергии возмущения, амплитуда волн растет по мере ее распространения по направлению вверх. Для поверхностного источника коэффициент усиления амплитуды достигает  $10^3$  на ионосферных высотах. Это позволяет понять, почему в ионосфере можно зарегистрировать атмосферные возмущения, которые едва различимы на фоне атмосферных шумов в приземном слое. Например, типичные амплитуды смещения поверхности в океане порядка сантиметров (десятков сантиметров) в нижней ионосфере станут десятками (сотнями) метров.

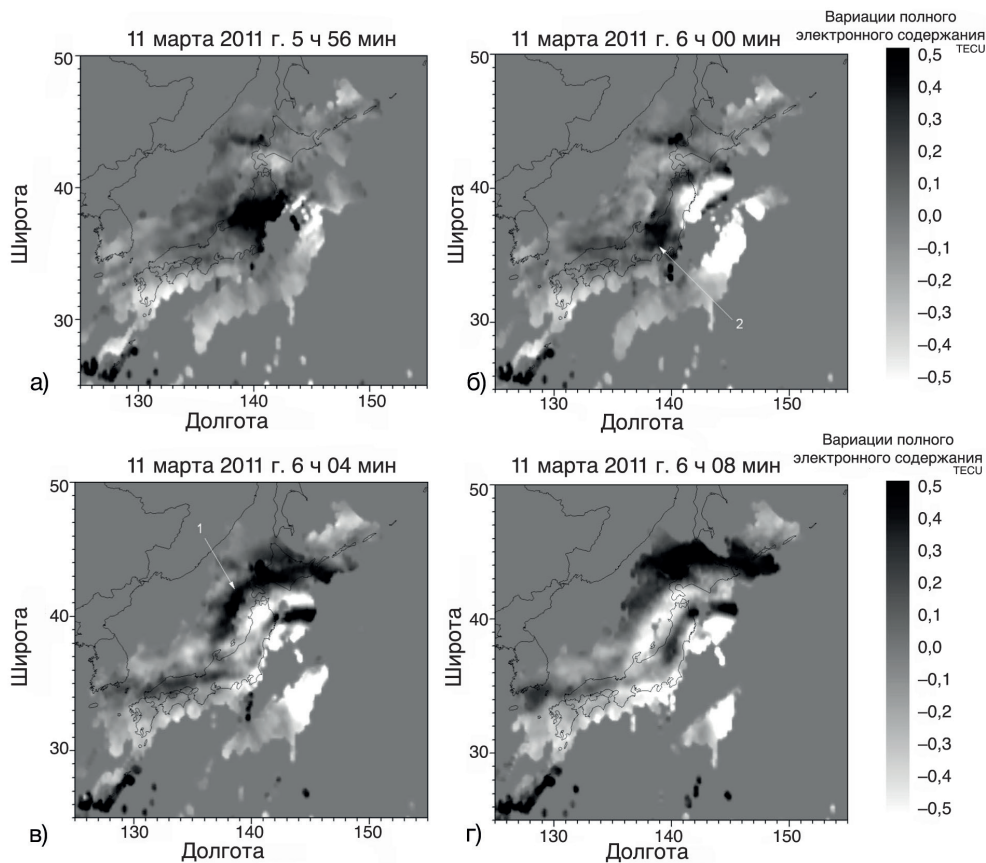
#### ИОНОСФЕРА НАД ТОХОКУ-ОКИ

Землетрясение, произошедшее 11 марта 2011 года восточнее японского острова Хонсю (с координатами эпицентра в океане  $38,32^\circ$  с.ш.,  $142,37^\circ$  в.д.), имело магнитуду, равную 9,0 (сейсмический момент соответствовал  $3,9 \times 10^{22}$  Дж, согласно данным Геологической службы США). После этого землетрясения, получившего название "события в Тохоку-оки", возникло разрушительное цунами, достигшее вблизи

побережья высоты в несколько десятков метров и приведшее к аварии на атомной станции "Фукусима-1", что привело к трагедии национального масштаба. Это землетрясение класса мега-события, то есть имеющее глобальное влияние, начиная с 1900 г., было только 5 подобных событий), произошло вблизи от самой плотной сети приемных GPS-станций.

Американская группировка GPS включает не менее 24-х спутников "Навстар", расположенных на шести 12-часовых круговых орбитах высотой около 20 тыс. км и наклоном  $55^\circ$ ; сигналы от четырех спутников можно принимать из любой точки на земной поверхности. Спутники передают высокостабильные когерентные сигналы на частотах 1575,42 и 1227,6 МГц. Для зондирования ионосферы используют измеряемые фазы радиосигналов, распространяющихся от спутника до наземного приемника. Фазовые данные позволяют вычислить полное электронное содержание ионосферных возмущений (ПЭС): интеграл от плотности электронной концентрации – вдоль луча, соединяющего передатчик и приемник, а также его вариации.

Японская сеть насчитывает более 1200 GPS-приемников, каждый из которых регистрирует одновременно

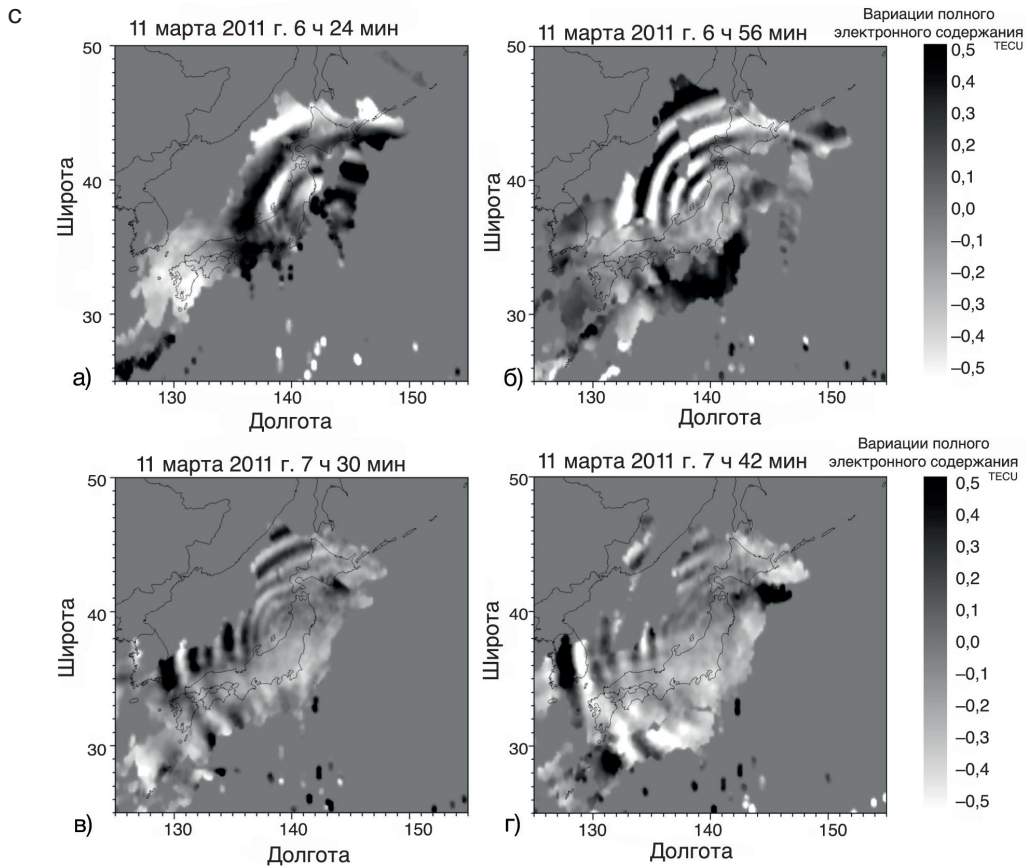


*Начало генерации акустическими волнами ионосферных возмущений, вызванных землетрясением (показано стрелкой 1) и сейсмической волной Релея (показано стрелкой 2). Для каждого фрагмента двумерной карты (а), б), в), г)) по вертикальной и горизонтальной осям отложены широта и долгота соответственно; в верхней части каждого фрагмента указаны дата и универсальное время по Гринвичу. Справа приведена шкала вариаций ионосферных возмущений. По данным Куницына и др., 2011 г.*

сигналы от примерно 10-ти спутников “Навстар”. Такая сеть GPS-приемников позволяет получать пространственно-временные распределения электронной концентрации с разрешением, достаточным для выявления картины волновых движений. Для

анализа “отклика” ионосферы на возмущения от сейсмических событий производилось разделение “фоновой” (медленно меняющейся) и “волновой” (быстро меняющейся) компонент распределения электронной концентрации. В результате совместной ра-

боты исследователей из МГУ и ИФЗ РАН, принятой сразу после события в Тохоку-оки, были созданы двумерные карты вариаций вертикального содержания ПЭС, измеряемого в единицах TECU ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ электронов/м}^3$ ),



*Ионосферные возмущения: эволюция и затухание расходящегося кольцевого возмущения, обусловленного воздействием акустико-гравитационных волн, порождаемых землетрясением. Справа показана шкала вариаций ионосферных возмущений. По данным В.Е. Куницына и др. (2011 г.).*

интервалом 2 мин и пространственным разрешением 18,5 км, для региона Японских островов (25–50° с.ш., 125–155° в.д.) на протяжении нескольких дней, приуроченных к указанному землетрясению. Поскольку ионосфера не полностью “просвечивается” радиосигналами, то существуют ее области, которые не

ресекают лучи спутника-приемника; отсюда возникает мозаичность изображений.

Возмущение ионосферы (после рассматриваемого землетрясения в Тохoku-оки) начинается с внезапного увеличения ПЭС (порядка 3 TECU) в области с радиусом около 50 км (сдвинутой восточнее на

200 км от проекции эпицентра на ионосферу) на 6-й минуте после землетрясения; это даже быстрее, чем время, необходимое для распространения акустической ударной волны. Радиус области повышенного ПЭС достигает нескольких сотен километров к 10-й минуте, а за фазой сжатия начинает

формироваться фаза разряжения. В результате профиль ПЭС приобретает характерную для ударной акустической волны, генерируемой в эпицентре в момент землетрясения, форму буквы N. Отметим, что быстрое формирование фронта возмущения ПЭС свидетельствует о внезапном и значительном “поднятии” поверхности океана и, следовательно, – о возникновении цунами. Информация об этом в ПЭС зарегистрирована менее чем через 10 минут после события, тогда как разрушительной волне цунами (учитывая ее скорость – 200 м/с) потребовалось от 20 минут до получаса для того, чтобы достичь побережья. Эта разница во времени может быть использована Службой предупреждения о цунами заранее.

В верхней ионосфере от области, где прошла акустическая волна, начинают распространяться два типа возмущений: вдоль суши, на юго-запад и на север, со скоростью около 3 км/с и в виде кольцевого сегмента (на северо-запад) со скоростью около 1 км/с. Скорости возмущений соответствуют сейсмической волне Релея и акустико-гравитационной волне, распространяющимся вдоль земной поверхности и в верхней атмосфере.

От места “входа” первоначального акустическо-

го импульса в ионосферу распространяется отчетливое ионосферное возмущение в виде концентрических кругов, длина волны, амплитуда и скорость которого уменьшаются с течением времени от 1 км/с до 200 м/с, что соответствует скоростям акустико-гравитационных волн на этих высотах. Наблюдения показали, что такое возмущение длится несколько часов (в данном случае около 3-х часов); это трудно объяснить, если, например, предположить относительно “быстрое” возвращение возмущенной поверхности океана к равновесному положению, с последующим формированием цунами в источнике ионосферного возмущения. Такое упрощенное развитие процесса может и не быть, если учесть, что во вращающейся жидкости (или в атмосфере) с исчезновением возмущающей силы имеет место процесс геострофической адаптации, обнаруженный еще в 1941 г. академиком А.М. Обуховым; при этом часть энергии от первоначального возмущения “уносится” акустико-гравитационными волнами, а другая часть остается локализованной в области первоначального возмущения. Соответственно, в месте начального возмущения могут существовать долгоживущие локализованные вихри, исчезающие под

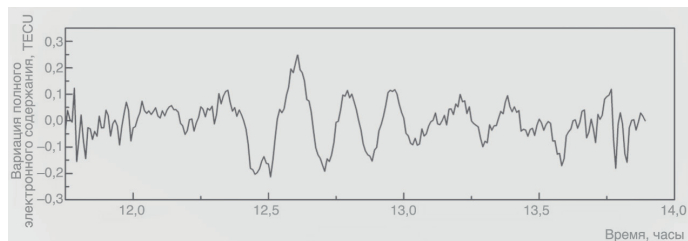
влиянием происходящих сравнительно медленных диссипативных процессов. При этом источник может находиться как на поверхности океана (в области “выхода” акустического импульса, после его распространения в толще океана), так и в атмосфере. Подобные явления наблюдались в ионосфере после проведения наземных взрывов.

#### ИОНОСФЕРА В ДАЛЬНОЙ ОТ ТОХОКУ-ОКИ ЗОНЕ

Рассмотрим теперь “отклик” ионосферы вдали от эпицентра. Поскольку после землетрясения в Тохоку-оки возникла мощная волна цунами, то справедливо рассматривать ее как источник атмосферных волн, – причем на значительном расстоянии от эпицентра, где фронт возмущения на поверхности океана уже сформировался. Такие условия складываются при распространении цунами на восток, через Тихий океан. Между Японией и Южной Калифорнией, – местом, где сосредоточена еще одна плотная сеть станций GPS, расположены Гавайские острова. С использованием данных этой сети (вместе с данными приемников на Гавайских островах), был реконструирован “отклик” ионосферы на землетрясение в Тохоку-оки, в дальней от эпицентра зоне (по изме-



График вариаций ионосферных возмущений, полученных для GPS-станции (mkea) и спутника (prn05) над Гавайскими островами 11 марта 2011 г. По данным С.Л. Шалимова и др. (2017 г.).

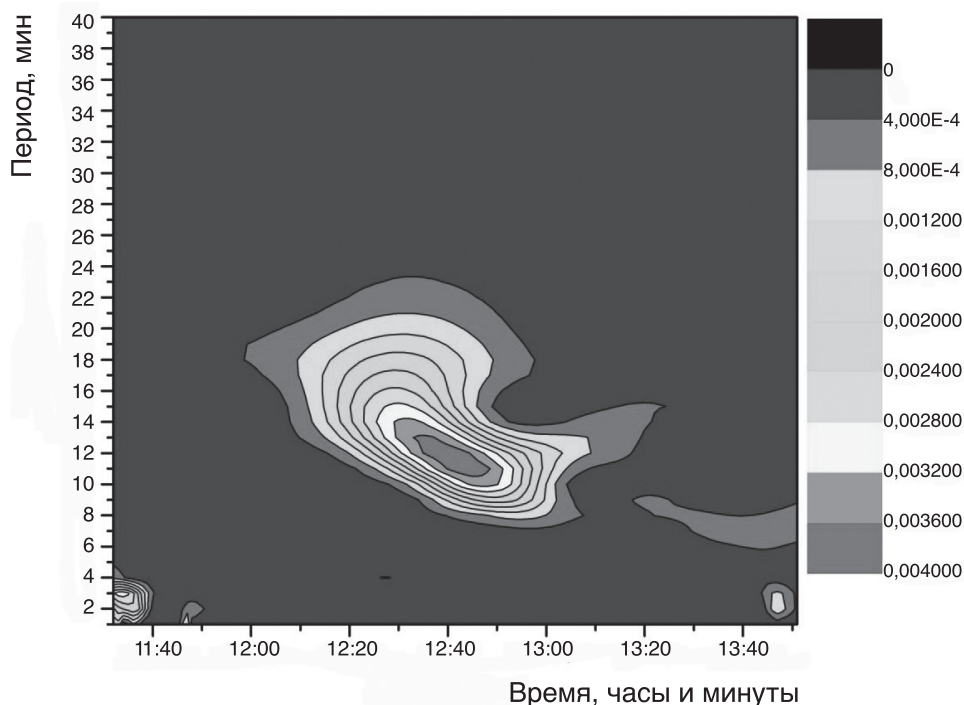


рениям вариаций TEC на одном из гавайских приемников GPS).

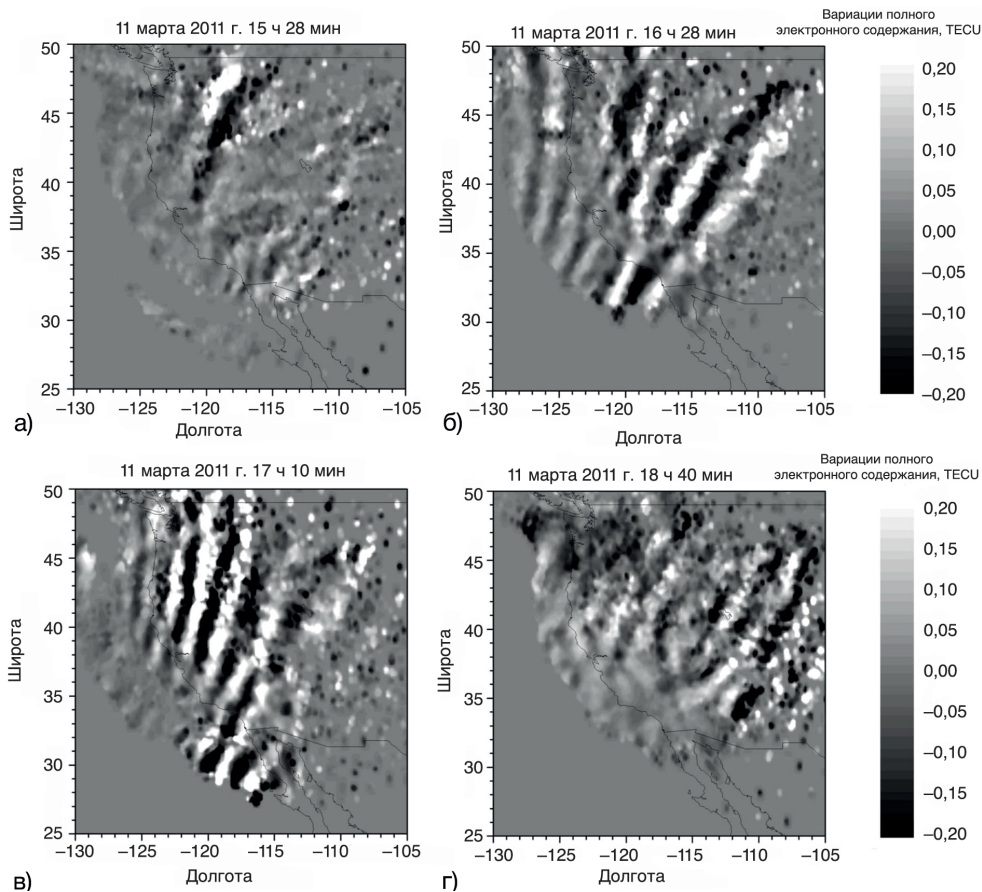
Волновые возмущения в ионосфере опережают цунами приблизительно на 1 час. Это подтверж-

дено регистрацией цунами с помощью системы DART (буй № 51 407 станции NOAA) вблизи о. Big Island, Гавайи (19,6° с.ш., 203.5° в.д.). При этом обнаруженные вариации плотности ионосферы на-

ходятся в диапазоне от 10 до 20 минут; это соответствует диапазону внутренних гравитационных волн, а низкочастотная часть возмущения приходит раньше, как и ожидалось.



"Отклик" ионосферы на землетрясение в Тохоку-оки: вейвлет-спектр вариаций. Справа представлена шкала сигнала (темный цвет внизу шкалы соответствует наибольшей интенсивности сигнала). По данным С.Л. Шалимова и др. (2017 г.).



Двумерные карты вариаций ионосферных возмущений, зафиксированных GPS-станциями над западным побережьем Северной Америки после землетрясения в Тохоку-оки (фрагменты соответствуют определенным моментам времени): а) – в 15 ч 28 мин, б) – в 16 ч 28 мин, в) – в 17 ч 10 мин, г) – в 18 ч 40 мин. По данным С.Л. Шалимова и др. (2017 г.).

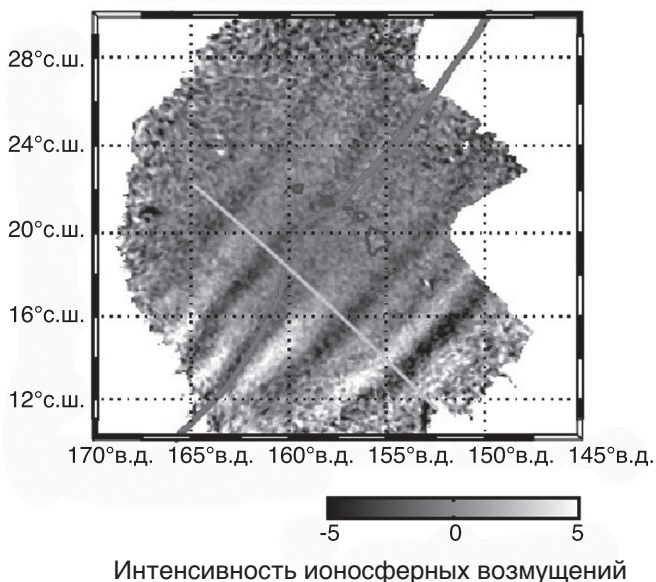
Далее рассмотрим ионосферный отклик, используя данные, полученные от плотной сети GPS-станций на западном побережье Северной Америки. Ионосферные волновые возмущения наблюдают в этом регионе и вне связи с сейсмическими события-

ми; они могут включать, например, ночные среднemasштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (*medium-scale traveling ionospheric disturbances, MSTIDs*) – распространяются на юго-запад, имеют длину волны от 200 до 500 км и протя-

женность по фронту – до 2000 км; а также дневные *MSTIDs*, обычно наблюдаемые зимой и в равноденствие с длиной волны от 300 до 1000 км и распространяющиеся на юго-восток до полудня и на юго-запад – после полудня. В промежуточные часы

Двумерная карта распределения вариаций свечения атмосферы линии 630,0 нм над районом Гавайских островов в диапазоне от 0,3 до 1,7 МГц, после землетрясения в Тохоку-оки. Жирная кривая соответствует местоположению цунами; в центре контурами очерчены Гавайские острова; прямой линией указано направление распространения цунами. На шкале внизу показана интенсивность ионосферных возмущений (в процентах). Адаптированный рисунок; взят из работы Makela et al. (2011 г.).

11 марта 2011 г. 12 ч 58 мин 01 с по Гринвичу, 0,3–1,7 МГц



наблюдается переход от одного режима распространения к другому, в результате чего хорошо организованные фронтальные структуры разрушаются из-за наложения MSTIDs, распространяющихся в разных направлениях.

Хорошо организованное волновое возмущение, зарегистрированное в ионосфере над западным побережьем Северной Америки, появилось 11 марта 2011 г. и наблюдалось в течение почти четырех часов. Направление распространения волновых цугов не вполне соответствует характерным для этого региона (и упомянутым выше) фоновым дополненным волновым возмущениям, отличаясь от

них временем появления (зима, равноденствие) и длительностью. Оцениваемая из данных скорость распространения волн в атмосфере – около 300 м/с. Они опережают предполагаемый источник (цунами) приблизительно на час, поскольку, по данным Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA), цунами достигло западного побережья США через 10–11 часов после землетрясения, произошедшего в Тохоку-оки.

Обратимся еще к одному экспериментальному подтверждению вывода об опережении ионосферных цунами, полученному группой американских исследователей. Отклик верх-

ней атмосферы на цунами после землетрясения 11 марта 2011 г. был обнаружен в дальней зоне от эпицентра, в красной линии свечения атомного кислорода, концентрация которого пропорциональна плотности ионосферных электронов. Измерения осуществлялись с помощью широкоугольной камеры, расположенной на вулкане Халеакала на о. Мауи (Гавайи), и “показали” наличие волновых возмущений, распространяющихся на высотах около 250 км в сторону от эпицентра, со скоростями, приблизительно равными скорости цунами. Это заключение было основано на совпадении времени появления волновых структур “свечения”, их

направления и скорости распространения с теми же характеристиками цунами. Однако сообщалось также и о появлении волновых возмущений за 1 час до прихода цунами, с вариациями интенсивности свечения в диапазонах фильтров от 0,3 до 1,7 мГц (радиодиапазон внутренних гравитационных волн). Оказалось, что “отклик” ионосферы представлен двумя группами волн – опережающими цунами и отстающими от нее. При этом отстающими оказываются более высокочастотные волны. При сравнении картины возмущений, наблюдаемой в вариациях интенсивности свечения с вариациями ПЭС можно отметить их хорошее соответствие.

Итак, с использованием данных, полученных от плотных сетей, принимающих сигналы GPS-станций в Японии и в Северной Америке, были получены двумерные распределения полного электронного “содержания” ионосферы как в ближней, так и в дальней зоне от эпицент-

*Общая схема распространения сверхдлинных волн (от передатчика к приемнику) между океаном и нижней ионосферой, “возмущенной” атмосферной внутренней гравитационной волной, источником которой является цунами.*

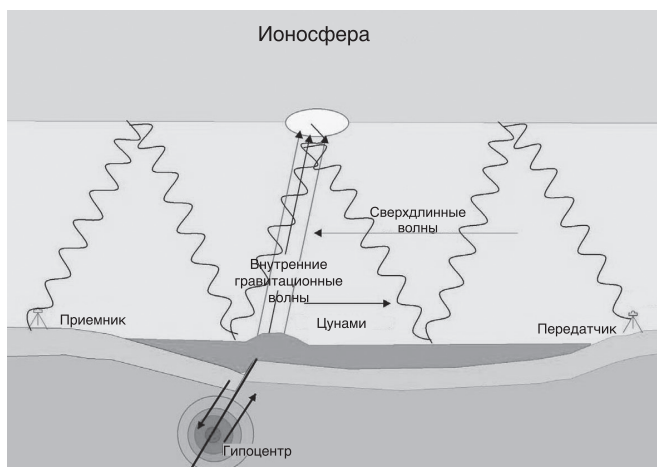
ра подводного землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. Главным результатом стало обнаружение в верхней атмосфере, вдали от эпицентра, волновых цугов, которые соответствуют атмосферным гравитационным волнам, генерируемым цунами. Установлено, что атмосферные волны при распространении могут заметно “опережать” цунами: этот эффект может быть использован в службах раннего предупреждения о цунами. Наличие у цунами предвестника в виде атмосферных внутренних гравитационных волн было подтверждено в численном моделировании и при анализе дисперсионного соотношения для волн в атмосфере.

нижняя ИОНОСФЕРА  
НАД ЦУНАМИ

При распространении в атмосфере внутренних гравитационных волн, ге-

нерируемых цунами, в верхнюю ионосферу эти атмосферные волны проходят “через” нижнюю ионосферу. Поэтому должен наблюдаться отклик и в нижних слоях ионосферы.

Специфика эксперимента, предпринятого для проверки этого обстоятельства российскими исследователями из ИФЗ РАН, заключалась в том, что использовался метод дистанционного исследования воздействий снизу на ионосферу, – регистрировались амплитудно-фазовые характеристики сигналов длинных и сверхдлинных волн, получаемых радиостанциями. Частоты этих сигналов (3–30 кГц) таковы, что они способны распространяться на тысячи километров от передатчика до приемника со слабым затуханием (~2 дБ на 1000 км), отражаясь от стенок естественного волновода Земля – ионосферы. Отражение от верхней



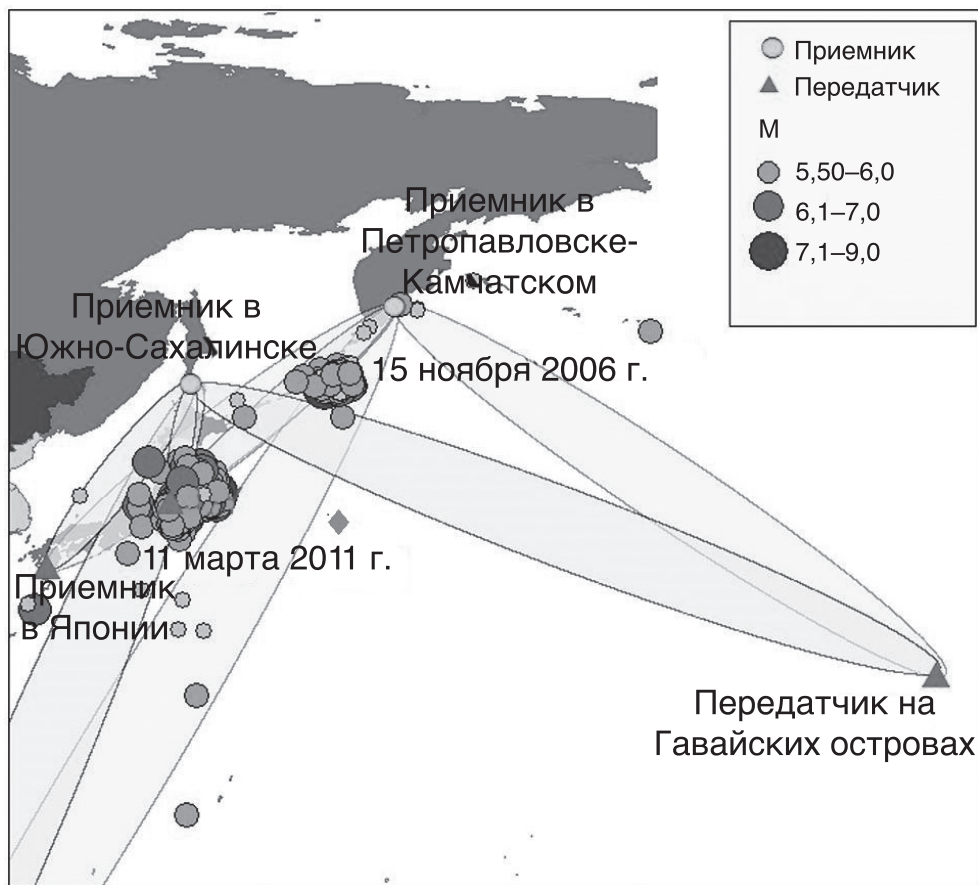


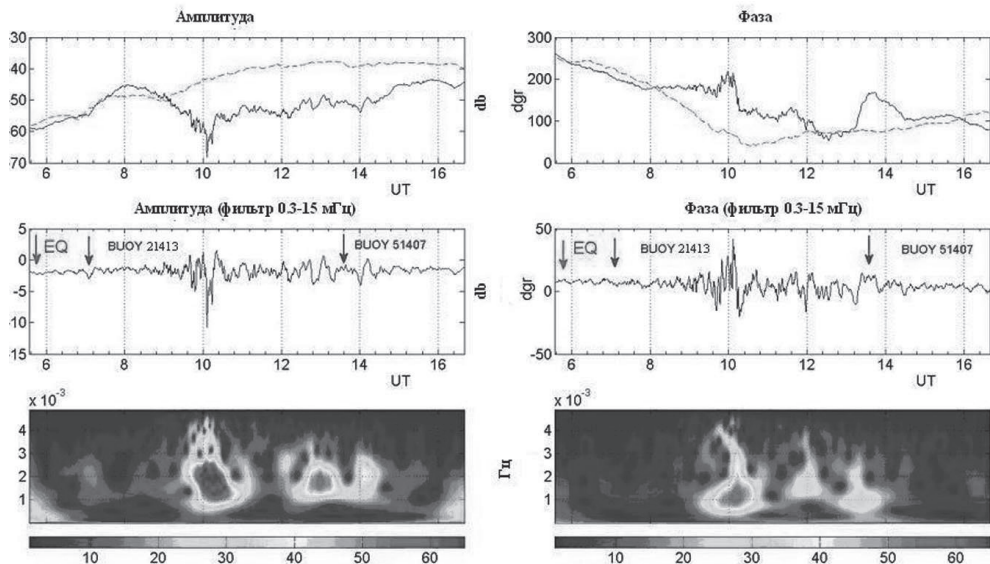
Схема взаимного расположения сверхдлинноволновых приемников и передатчиков, а также эпицентров двух землетрясений (Японского, 11 марта 2011 г. и Курильского, 15 ноября 2006 г.) и положение DART и GPS-станций в исследуемом регионе. Кружками обозначены эпицентры землетрясений разной магнитуды ( $M$ ) в период с ноября 2006 г. по март 2011 г. Эллипсами показаны зоны наиболее высокой чувствительности сверхдлинноволновых трасс; эллипсами показаны трассы, соединяющие приемники в Петропавловске-Камчатском (РТК) и в Южно-Сахалинске (YSH) с перечисленными выше передатчиками; ромбом в центре – DART 21413. По данным USGS/NEIC.

стенки волновода – ионосферы – происходит на высотах около 60 км днем и около 85 км ночью. Амплитуда и фаза сигналов является чувствительным индикатором состояния ионосферы.

Конечно, при таком методе исследования неизвестно, в какой именно

точке трассы имело место возмущение радиосигнала от сверхдлинных волн. Ясно только, что оно могло быть где-то в зоне чувствительности, между приемником и передатчиком. Несмотря на такой недостаток метода сверхдлинноволнового радиопросвечивания,

вполне возможен мониторинг состояния нижней ионосферы над всем Тихоокеанским регионом. В данном случае исследовали распространение сверхдлинных волн от передатчика к приемнику на трассе между океаном и нижней ионосферой, возмущенной атмосферной



Графики амплитуд и фаз сигнала, полученных с передатчика NPM (21,4 кГц) и зарегистрированного в Южно-Сахалинске 11 марта 2011 г.: верхняя панель – исходный сигнал, средняя – отфильтрованный. Пунктиром на графиках обозначен усредненный сигнал (фон); стрелки указывают на момент землетрясения и на регистрацию прихода цунами на станциях DART. Внизу – вейвлет-спектры отфильтрованного сигнала; шкалы внизу отражают интенсивность сигнала: темный цвет справа соответствует наибольшей интенсивности. По данным Rozhnoi et al. (2012).

внутренней гравитационной волной (источник которой – цунами).

Используемые российскими учеными приемные станции находятся в Петропавловске-Камчатском, Южно-Сахалинске и Мошири (Япония). Приемники измеряют одновременно амплитуду и фазу сигналов от нескольких передатчиков: JJY (40 кГц) и JJI (22,2 кГц) – в Японии, NWC (19,8 кГц) – в Австралии и NPM (21,4 кГц) – на Гавайских островах, с шагом дискретизации в 20 секунд. Для анализа сигналов от сверхдлинных

волн выбирается ночное время, – когда ионосфера наиболее “чувствительна” к внешним воздействиям.

Для того, чтобы представить, как выглядят возмущения амплитуды и фазы от волн на трассах в ночное время, рассмотрим снова пример землетрясения, произошедшего 11 марта 2011 г. в Тохоку-оки. Согласно расчетам, заложенным в программе ТТТ (Tsunami Travel Time), направление распространения цунами после этого события должно было быть приблизительно вдоль трассы, “со-

едняющей” передатчик на Гавайях (NPM) и приемник в Южно-Сахалинске (YSH); другие трассы были контрольными. Было зарегистрировано аномальное уменьшение амплитуды (до порядка 10 Дб) и вариации (отклонения) фазы сигнала до 50° по сравнению с “невозмущенным” периодом. При этом “приход” цунами на глубоководную станцию DART-21413 был зарегистрирован через 1 ч 13 мин после землетрясения (цунами распространилось в юго-восточном направлении на 1224 км со средней

скоростью 284 м/с). Почти одновременная регистрация внутренних гравитационных волн (ВГВ) в ионосфере и цунами в океане указывает на более раннюю генерацию ВГВ и опережение атмосферной волной порождающее ее цунами (необходимо около часа для того, чтобы атмосферная волна достигла нижней ионосферы). Кроме того, необходимо около 30 мин для того, чтобы нейтральные частицы атмосферы перераспределились в процессе их ионизации рассеянным излучением Солнца в линии Лайман- $\alpha$  (главный источник ионизации ночной нижней ионосферы). Значительный подъем высоты ионосферы при прохождении “вечернего терминатора”, по-видимому, временно маскирует развитие возмущения. Отметим почти идентичный спектральный состав цунами и ВГВ в

нижней ионосфере – от 8 до 30 мин. Таким образом, предположение о цунами, как об источнике ВГВ, подтверждается.

Приведенные примеры демонстрируют большие возможности глобальных сетей наблюдения, но далеко не исчерпывают их. Перспективными направлениями в развитии исследований в ближайшее время будет практическое воплощение “ионосферного сейсмометра”, – когда в процессе зондирования ионосферы станет возможным изучение сигнала (возмущение ионосферной плотности), обусловленного прохождением сейсмической волны Рэлея, и соответствующей дисперсии групповой скорости; по этой информации можно восстанавливать модуль упругости литосферы в точке “под ионосферой”. Кроме этого, GPS-сигналы, регистрируемые с помощью се-

ти приемных станций как ионосферный “отклик” на прохождение акустических волн после ряда сильнейших ( $M > 8,2$ ) подводных землетрясений, могут содержать информацию о размерах эпицентра землетрясения и об “энергетических характеристиках” сейсмических событий.

В ИФЗ РАН проведены оценки “сейсмической” энергии от таких событий по форме характерного возмущения полного электронного содержания ионосферы (длительности фазы сжатия ударной волны), которые согласуются с оценками, полученными в результате изучения сейсмических данных. Важно отметить, что такие оценки энергии источника могут быть получены на интервале менее 15 мин после события; это позволяет заблаговременно информировать население о возможности возникновения цунами.

---

## Информация

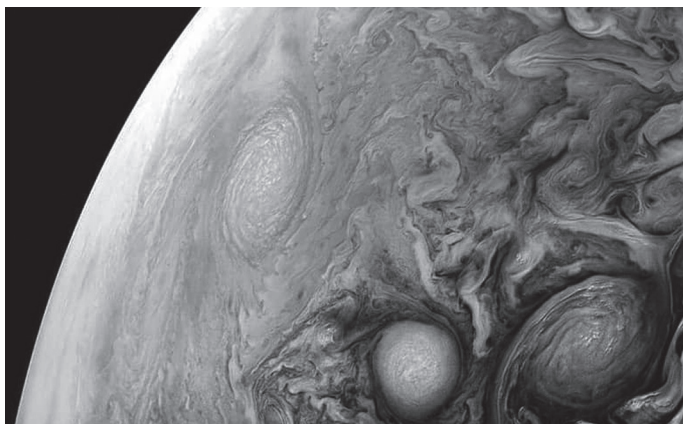
---

### **“Юнона”: Юпитер крупным планом**

К июню 2018 г. американская АМС “Юнона” (“Juno”; Земля и Вселенная, 2011, № 6, с. 31) пролетела расстояние 230 млн км на орбите искусственного спутника Юпите-

ра. 24 октября 2017 г. состоялось 9-е по счету сближение станции с Юпитером (Земля и Вселенная, 2018, № 2, с. 103). 10-й пролет был выполнен 16 декабря 2017 г. на минимальном расстоянии (13 345 км) от верхней кромки облаков газового гиганта. 7 февраля 2018 г. “Юнона” совершила 11-й пролет на расстоянии 3,5 тыс. км от вершин облаков планеты.

Напомним, что 27 августа 2016 г. станция пролетела со скоростью 208 тыс. км/ч на минимальной высоте 4200 км от верхней кромки облаков Юпитера и вышла на стабильную орбиту вокруг планеты (Земля и Вселенная, 2017, № 5, с. 76–78). Первые два месяца после выхода на орбиту вокруг Юпитера (4 июля 2016 г.) станция затратила на проверку



Северное полушарие Юпитера на 50,2° широты. Снимок сделан 1 апреля 2018 г. во время пролета АМС «Юнона» около Юпитера на расстоянии 12 326 км – до верхних слоев облачного покрова. Фото NASA/JPL/Caltech/SwRI/MSSS/К. Гилл.

всех научных инструментов, а научные данные от нее были получены только в конце августа 2017 г. Переход на новую, более удобную для ведения исследований орбиту, должен был состояться в середине октября 2016 г., однако буквально перед началом этого маневра NASA зафиксировало неполадки в работе двигателя; поэтому пришлось отложить маневр до даты следующего сближения станции с Юпитером – 11 декабря 2016 г. Впоследствии специалисты отказались от перевода станции на более близкую к Юпитеру орбиту; поэтому она сближается с планетой не раз в две недели, как планировалось, а раз в 53,4 дня. Начиная с 2017 г. исследования Юпитера проводятся – с высокоэллиптической орбиты: высота перигевия – 4700 км, высота в апогевии – более 8 млн км (39 R<sub>J</sub>), наклонение – 89,8°, период обращения – 53 сут 10 ч 03 мин.

1 апреля 2018 г. произошло 12-е сближение станции с Юпитером. Удаляясь от него, «Юнона» смогла сфото-

графировать с необычного ракурса Большое Красное Пятно (БКП) – «вечный» антициклон на экваторе (направление съемки – вид «снизу», со стороны Южного полушария). Как отмечают в NASA, такие снимки позволяют сравнить этот атмосферный вихрь с другими ураганами, бушующими около южного полюса планеты, которые можно увидеть в нижней части снимков (см. стр. 2 обложки). Исследование структуры, динамики и химического состава БКП – главная задача программы АМС.

Причина, по которой антициклон в БКП продолжает существовать столь долгое время, связана с физической природой Юпитера: у планеты нет твердой поверхности, поэтому циркулирующие в атмосфере вихри сохраняются в течение всего времени его наблюдения – более 350 лет. У астрономов пока нет точного объяснения столь яркой окраски шторма, но предполагается, что это могут быть либо сложные органические молекулы,

либо красный фосфор; либо полирадикалы серы, возникающие в результате химической реакции при ультрафиолетовом облучении и термическом воздействии на гидросульфиды аммония (входящие в состав облаков).

По данным «Юноны» оказалось, что вихрь в БКП уменьшается в размерах, приобретая при этом более круглую форму и растягиваясь по высоте (Земля и Вселенная, 2015, № 1, с. 86). Начиная с 2005 г., скорость дрейфа урагана на запад по отношению к скорости вращения планеты неуклонно возрастала. БКП становится темнее (с 2014 г.) на длинах волн короче 650 нм, то есть вихрь стал более оранжевым, при этом его ядро уменьшилось в размерах. Это может быть связано с увеличением потока ультрафиолетового излучения на больших высотах; взаимодействуя с химическими веществами в облаках, он делает более насыщенным цвет. Скорости ветров внутри бури увеличивались на его восточном и западном краях и уменьшались на севере и на юге, что приводило к уменьшению относительной завихренности циркуляционных



процессов. Предполагается, что размер и скорость дрейфа БКП тесно коррелируют с его местоположением и, возможно, с изменениями окружающих его атмосферных потоков. Изменения структуры и цвета урагана, наблюдавшиеся в 2014–2017 гг., могут быть вызваны изменениями во внутренней динамике ветров (но не связью со скоростью дрейфа). Дальнейший анализ вертикальной структуры вихря, профиля температуры и ветровой динамики даст более ясное понимание процессов его эволюции.

Во время 10–12-го пролетов около Юпитера с помощью АМС “Юнона” получены новые данные о структуре и химическом составе его атмосферы. Анализ ее динамики показал, что гравитационное поле планеты ассиметрично в направлении север–юг. Ученые связывают этот факт с движением конвективных газовых потоков, выносящих внутреннее тепло в верхние слои атмосферы; оно проявляется в виде светлых зон и темных поясов. В области светлых зон отмечается повышенное давление, соответствующее восходящим потокам. Облака, образующие зоны, располагаются на более высоком уровне, а их светлая окраска объясняется, видимо, повышенной концентрацией яркочерных кристаллов аммиака. Располагающиеся ниже темные облака поясов представляют собой области нисходящих потоков, предположительно состоящих из красно-коричневых кристаллов гидросульфида аммония и имеющих более высокую температу-

ру. Потоки на северном и южном полюсе Юпитера могут переносить разную массу вещества, что объясняет неравномерность влияния гравитационного поля. Удалось измерить массу (около 1% М<sub>J</sub>; что составляет 3 М<sub>3</sub>) и глубину знаменитых облачных поясов (их толщина составляет около 3000 км); ниже атмосферные потоки теряют скорость (возможно, их “замедляет” сильное магнитное поле Юпитера) и разрушаются. Для сравнения: на земную атмосферу приходится лишь 10<sup>-6</sup> массы нашей планеты. Из-за быстрого периода вращения Юпитера (около 10 часов) облачные пояса планеты имеют форму вложенных цилиндров. Данные, полученные с помощью “Юноны”, говорят о том, что ниже 3000 км характер вращения вещества планеты уже соответствует характеристикам твердого тела.

С помощью инструмента JIRAM получены инфракрасные изображения атмосферных образований, находящихся на расстоянии 50–70 км ниже облачного покрова планеты. Оказалось, что на северном полюсе Юпитера доминирует центральный циклон, окруженный восемью меньшими циклонами диаметрами от 4000 до 4600 км. Вместе они образуют фигуру, похожую на восьмиугольник. На южном полюсе тоже есть доминирующий, центральный, циклон: вокруг него расположено пять циклонов пентагональной формы диаметром от 5600 до 7000 км. Циклоны очень медленно дрейфуют вокруг полюсов и, несмотря на близкое расположение друг к другу, сохраняют удивительную стабильность, не распадаясь и

не сливаясь в одно целое. Ничего подобного нет ни на одной другой планете Солнечной системы.

NASA опубликовало захватывающие видео движущихся облаков Юпитера из снимков, сделанных с помощью АМС “Юнона”. Экспертам теперь будет легче определить траекторию и скорость движения облаков; благодаря этим параметрам можно изучать погодные условия на планете.

24 мая 2018 г. “Юнона” выполнила очередной, 13-й, пролет около Юпитера. Атмосфера планеты на снимках, сделанных “Юноной”, похожа на огромный кипящий котел: в ней можно найти вихри и облака, созданные атмосферными течениями самых разных форм и размеров. Обнаружено больше антициклонов (центров высокого давления), чем циклонов (центров низкого давления), причем первые обычно выглядят яркими, имеют овальную (или круглую) форму и “живут” гораздо дольше циклонов. Эти вихри существуют в определенных зонах, где есть благоприятные условия для их образования, и могут расти путем слияния с другими штормами.

Следующее сближение с планетой-гигантом запланировано на 16 июля 2018 г. По его результатам специалисты оценят состояние всех систем аппарата и примут решение о продлении (или же прекращении) миссии.

*Пресс-релизы NASA,  
6 апреля, 19 и 31 мая 2018 г.*

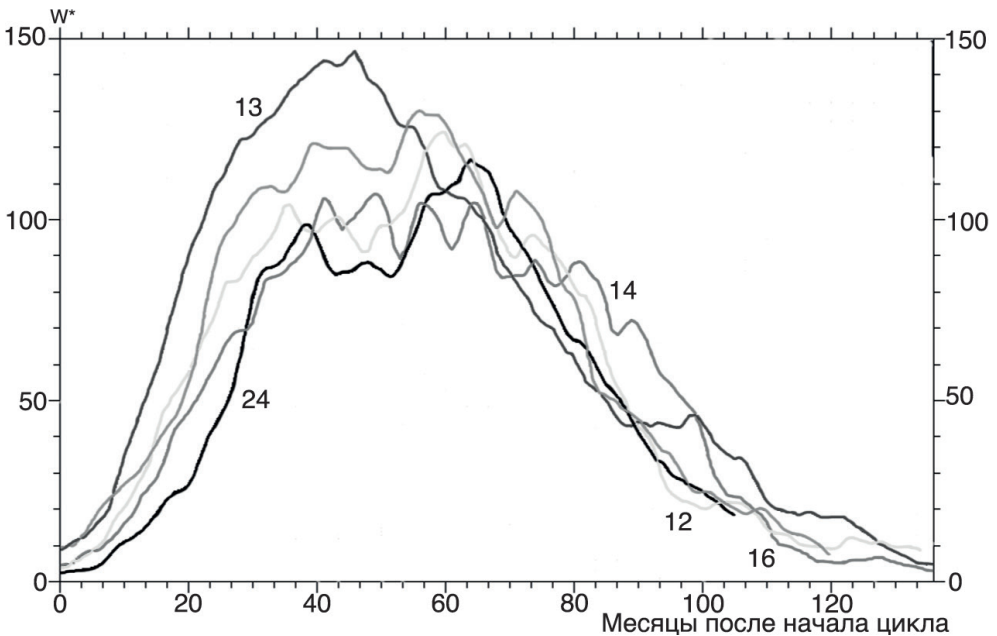


## Солнце в апреле – мае 2018 г.

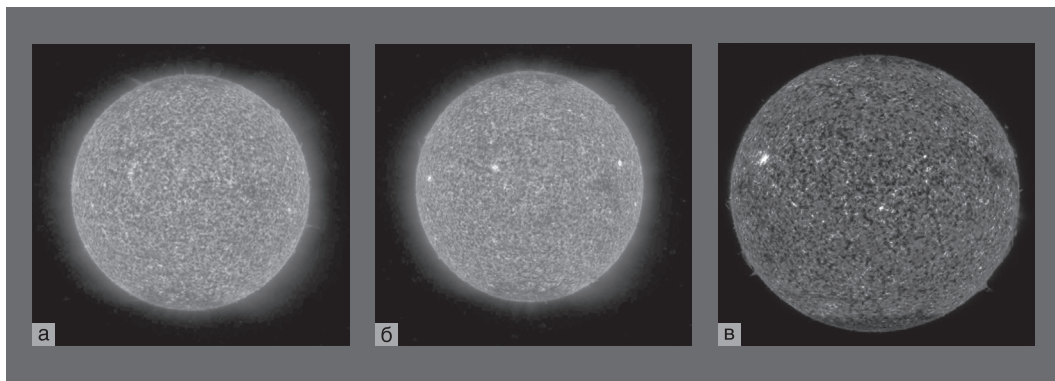
Пятнообразовательная активность в весенние месяцы 2018 г. была на очень низком ( $W^* \leq 15$ ), низком ( $W^* \leq 30$ , 10 суток) и среднем ( $W^* > 30$ , 3 суток) уровнях, а в течение 23 суток видимый диск Солн-

ца был беспятенным (всего 80 суток в текущем году). Из 9 небольших групп солнечных пятен 7 появились в Северном полушарии и две существовали всего 1 сутки. Кривая роста сглаженного за

год значения относительного числа пятен продолжает уверенно спадать, оставаясь в пределах изменений 12-го и 16-го солнечных циклов, что дает возможность ожидать точку минимума текущего



Ход развития (106 месяцев) текущего, 24-го цикла солнечной активности, среди достоверных (начиная с 1849 г.) низких и среднего (№ 13) солнечных циклов.  $W^*$  – сглаженные за 13 месяцев относительные числа солнечных пятен в новой системе (введена 1 июля 2015 г.). Высота текущего солнечного цикла в новой системе составляет  $Wn^* = 116$  против  $W^* = 82$  – в старой.



Солнце 11 и 12 апреля 2018 г.: а – в линии крайнего ультрафиолета He II ( $\lambda = 304$ ). 11 апреля обратная сторона Солнца – без активных областей (а), 12 апреля на обратной стороне Солнца появились две активные области (б) и одна – на видимом диске Солнца (в). Снимки получены с помощью космических солнечных обсерваторий “STEREO A” и “SDO” (<http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>).

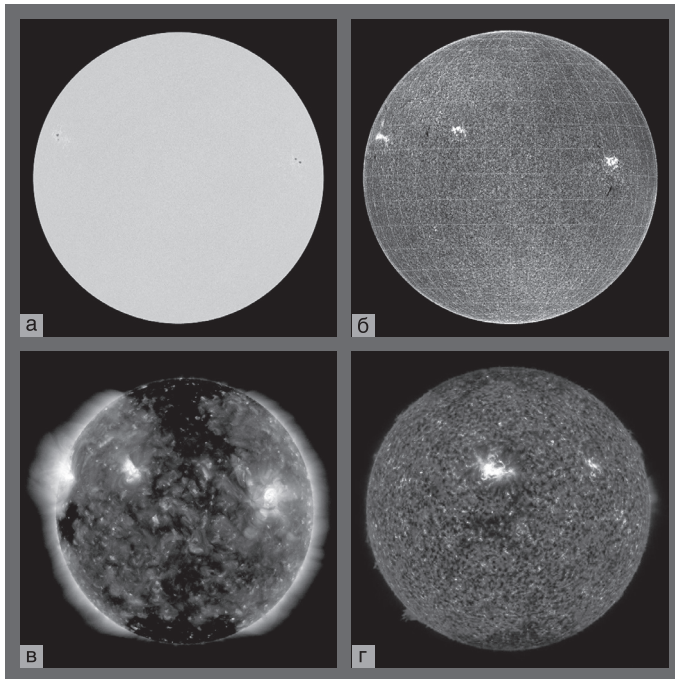
цикла во второй половине 2020 г. Текущие среднемесячные значения чисел Вольфа (мы, как и Служба состояния околоземного пространства – [www.swrsc.noaa.gov](http://www.swrsc.noaa.gov) – будем придерживаться старой, классической системы)  $W_{\text{апр.}} = 5,3$  и  $W_{\text{мая}} = 8,0$ . Сглаженное значение этих индексов в октябре и в ноябре 2017 г. составило  $W^* = 10,0$  и  $W^* = 9,2$  соответственно.

В первой декаде апреля пятен на Солнце не было, и лишь 12 апреля в Северном полушарии возникла небольшая группа пятен, просуществовавшая только трое суток, затем, до 18 апреля, видимый диск Солнца снова был без пятен. С 11 на 12 апреля на всем Солнце примерно в  $120^\circ$  долготы в Северном полушарии образовались сразу три активных области: две на обратной стороне и одна – в восточной

части видимого диска. Группа пятен на видимой с Земли полусфере просуществовала с 12 по 14 апреля; две другие последовательно появлялись из-за восточного лимба 16 и 19 апреля, причем последняя вышла группой среднего размера; ее площадь 21 мая достигла 130 мдп (размеры Земли – 156 мдп) и затем, постепенно распадаясь, она просуществовала до 27 апреля. Максимальное ежедневное значение относительного числа солнечных пятен отмечено 21 апреля ( $W = 28$ ), минимальное – 2–9, 11, 18 и 28–30 апреля ( $W = 0$ ). Вспышечная активность была на очень низком уровне весь период. Выбросы солнечных волокон (3 события) наблюдались 1, 19 и 20 апреля. Коронграфы космической обсерватории “SOHO” зарегистрировали более 13 корональных выбросов вещества. Три

рекуррентные (повторяющиеся через оборот Солнца) корональные дыры проходили по видимому диску Солнца. Высокоскоростные потоки от них вызвали в околоземном космическом пространстве возмущенные периоды: 5–6 и 11–12 апреля и умеренную магнитную бурю 20 апреля. Всего же в геомагнитном поле зафиксировано четыре возмущенных дня. На геостационарных орбитах с 1 по 4 и с 10 по 30 апреля наблюдались высокие потоки ( $> 10^7$  частиц/м<sup>2</sup>) релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ.

Первые трое суток мая на видимом диске Солнца пятна отсутствовали. 3 мая в восточной части Южного полушария образовалась совсем небольшая группа пятен, которая просуществовала до 13 мая; после чего на видимом диске Солнца они не наб-



Солнце 25 мая 2018 г.: а – фото­сфера в непрерывном спектре ( $\lambda = 4500 \text{ \AA}$ ); б – в самой сильной линии водорода  $H_{\alpha}$  ( $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ ); в – в линии крайнего ультрафиолета  $Fe\ XII$  ( $\lambda = 193 \text{ \AA}$ ); г – в линии крайнего ультрафиолета  $He\ II$  ( $\lambda = 304 \text{ \AA}$ , SDO). Снимки получены с помощью космической солнечной обсерватории SDO и наземной обсерватории Big Bear ( $H_{\alpha}$ ; <http://www.solarmonitor.org/>).

по 8, 11 и 12 мая. Умеренная магнитная буря была отмечена 5–6 мая и малые 6–7, 11–12 мая; все были вызваны прохождением Земли через высокоскоростные потоки от корональных дыр. На геостационарных орбитах с 6 по 17 мая регистрировались высокие потоки ( $> 10^7$  частиц/м<sup>2</sup>) релятивистских электронов с энергиями, больше 2 МэВ.

Текущее состояние солнечной активности и ее прогноз на русском языке можно найти в интернете (<http://www.izmiran.ru/services/saf/>). Страница обновляется каждый понедельник.

*В.Н. ИШКОВ,  
ИЗМИРАН*

людались вплоть до 21 мая. Последнюю декаду мая видимый диск Солнца в Северном полушарии проходили три группы пятен, причем надо отметить, что одна из них (появившаяся на видимом диске 24 мая) просуществовала до конца месяца. Максимальное наблюдаемое относительное число солнечных пятен отмечено 27 мая ( $W = 36$ ), минимальное – 1–3 и 14–20 мая ( $W = 0$ ). Вспышечная активность была на низком уровне 23 и 28 мая, на очень низком уровне – в остальной период. Выбросы

солнечных волокон (11 событий) наблюдались 6, 7, 10 (2), 11 (2), 14, 17, 20 (2) и 25 мая. Коронграфы космической обсерватории “SOHO” зарегистрировали более 11 корональных выбросов вещества разной интенсивности, один из которых (3 мая) был II типа (угловая ширина 90–180°). В мае возникли три рекуррентных корональных дыры и пять вновь образованных, все они внесли вклад в возмущения магнитной обстановки околоземного космического пространства. Геомагнитное поле было возмущенным с 5

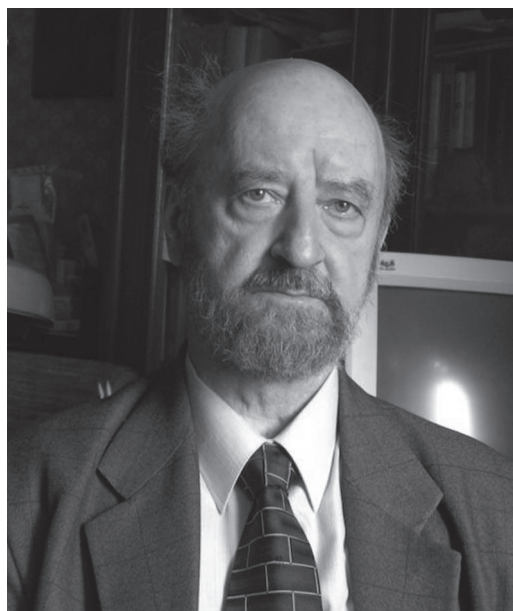
## Памяти Азария Григорьевича Гамбурцева

12 апреля 2018 г. не стало замечательного человека, нашего коллеги Азария Григорьевича Гамбурцева – известного ученого, главного научного сотрудника Института физики Земли РАН, доктора физико-математических наук, академика РАН, вся жизнь которого была тесно связана с нашим институтом.

Он был хорошо известен как ученый, активно работавший в области изучения взаимосвязей между различными природными, биологическими и социальными процессами в широких пространственно-временных масштабах. Эти исследования объединили усилия ученых, работающих в разных направлениях. Они послужили основой для разработки комплексного геодинамического, экологического, социального и медицинского мониторинга природопользования, а также для создания стратегии его эффективного развития.

Результатом работ стала пятитомная серия тематических сборников под общим названием "Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов" (М., 1994–2013). За этот труд Постановлением от 22 февраля 2007 г. А.Г. Гамбурцеву (в числе десяти ученых разных специальностей) была присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники 2006 года за разработку и внедрение систем-

ного экологического мониторинга как компонента стратегической безопасности. Атлас подготовлен совместно с В.А. Черешневым (руководитель редакционного коллектива), Н.А. Агаджаняном, О.И. Аптикаевой, В.А. Грачёвым, Е.А. Жалковским, Ф.А. Летниковым, В.Н. Расторгуевым, П.И. Сидоровым и Ф.Н. Юдахиним.



*А.Г. Гамбурцев в своем кабинете в ИФЗ РАН. Последние годы жизни.*

*На практике после 4-го курса МГУ. 1957 г.*

---

А.Г. Гамбурцев родился 24 апреля 1935 г. в уникальной семье геофизиков. Его отцом был один из создателей отечественной сейсморазведки, автор ряда методов поисковой геофизики, впоследствии – директор Института физики Земли РАН академик Григорий Александрович Гамбурцев, а мама – Вейцман Перль Самуиловна (она также работала в ИФЗ РАН в должности старшего научного сотрудника).

В 1958 г., после окончания геологического факультета МГУ, Азарий Григорьевич пришел на работу в Институт физики



*Перед вручением премии на ступенях Дома Правительства РФ: академик РАН П.И. Сидоров, доктор философских наук В.Н. Расторгуев, академик РАН Н.А. Агаджанян, академик РАН В.А. Черешнев, доктор технических наук Е.А. Жалковский, кандидат физико-математических наук О.И. Аптикаева, член-корреспондент РАН Ф.Н. Юдахин, доктор физико-математических наук А.Г. Гамбурцев. 2007 г.*

---

Обложка монографии О.К. Кондратьева и А.Г. Гамбурцева "Сейсмические исследования в прибрежной части восточной Антарктиды" (М.: изд-во Академии наук СССР, 1963).

Земли. Первые его исследования были посвящены изучению глубинного строения Антарктиды сейсмическими методами. В начале своей научной карьеры, с 1958 по 1961 гг., он участвовал в обобщении и интерпретации материалов, полученных в рамках реализации программы Международного геофизического года (1957–1958 гг.). Результатом работы молодого исследователя стала монография "Сейсмические исследования в прибрежной части восточной Антарктиды" (1963), в соавторстве с О.К. Кондратьевым.

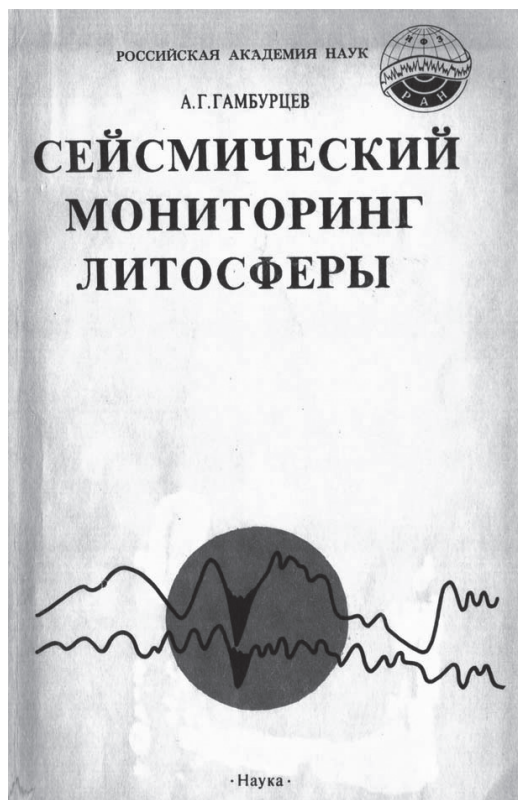
До 1978 г. А.Г. Гамбурцев работал в лаборатории сейсмических методов разведки и занимался вопросами распространения сейсмических волн в сложно-построенных неоднородных средах в разных районах СССР (саратовское Поволжье, пермское Приуралье, Грузия, Якутия). Эти исследования позволили определить фильтрационные и другие свойства зоны малых скоростей и показать их влияние на отраженные (и проходящие) продольные и поперечные волны.

В 1968 г. он защитил кандидатскую диссертацию. С 1978 по 1998 гг. работал в отделе экспериментальной геофизики. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию на тему "Сейсмический мониторинг земной коры"; с 1998 г. руководил Лабораторией природных ритмических процессов в ИФЗ РАН.

Начиная с 1974 г. Азарий Григорьевич начинает заниматься исследованиями временных вариаций сейсмических волновых полей, в связи с разработкой проблемы прогноза землетрясений и другими задачами современной геоди-



намики. Под его научным руководством был проведен большой цикл экспериментальных работ в Средней Азии – на Токтогульском и Нурекском водохранилищах – и осуществлен семилетний мониторинг литосферы в Южном Таджикистане с использованием взрывов. Им была разработана методология сейсмического мониторинга, сформированы подходы к изучению фоновых процессов в литосфере и изучению предвестников землетрясений природного и техногенного характера. Особенно важным в сейсмологии стало новое направление – сейсмический мониторинг нефтяных и газовых месторождений. Ученый возглавлял работы по сейсмическому мониторингу на готовящемся к разработке гигантском нефтяном месторождении Тенгиз. Имевшийся богатый опыт сейс-



Обложка монографии А.Г. Гамбурцева "Сейсмический мониторинг литосферы" (М.: Наука, 1992).

моразведочных работ помог А.Г. Гамбурцеву по-новому подойти к решению задач современной геодинамики и геоэкологии и добиться важных результатов. Развитые им подходы проведения геофизического мониторинга легли в основу ряда тематических разделов в программах фундаментальных исследований Президиума РАН "Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы" (№ 16) и "Происхождение и эволюция биосферы" (№ 18).

А.Г. Гамбурцев написал монографию "Сейсмический мониторинг литосферы" (1992), а также участвовал в написании нескольких коллективных монографий и сборников статей по этой тематике. В них была изложена концепция геодинамического мониторинга и развиты физические, геологические и методические основы геодинамического мониторинга, освещены вопросы его постанов-

ки, обработки и интерпретации данных, а также комплексирования с другими методами. Эти работы побудили Азария Григорьевича заняться рассмотрением междисциплинарных вопросов анализа общих и индивидуальных черт протекания процессов в земной коре и в других природных сферах во времени. Эти выводы стали основой разделов по мониторингу в государственных программах и опубликованы в монографии "Сейсмический мониторинг земной коры" (1986) и ряде других трудов.

Главным результатом его исследования стало создание фундаментального труда – пятитомного "Атласа временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов" Первый его том вышел в свет в 1994 г., пятый – в 2013 г. Эта серия преследует две основные цели. Первая – это установление неизвестных ранее закономерностей протекания природных и социальных процессов в природе и в социуме. Вторая, более практическая: "способствовать сохранению человечества и биосферы", – так сообщается в аннотации.

«В результате мы многое поняли и задались целью определить причинно-следственные связи между процессами в природе и в обществе и продвинуться в проблеме прогнозирования будущих процессов и явлений», – пишет Азарий Григорьевич об исследованиях, представленных в "Атласах", во введении к пятому тому. – «Мы до сих пор руководствуемся этой целью, и материалы опубликованных четырех томов Атласа это подтверждают. В то же время мы поставили (может быть, временно) более узкую, но не менее важную задачу – определить основные свойства динамики



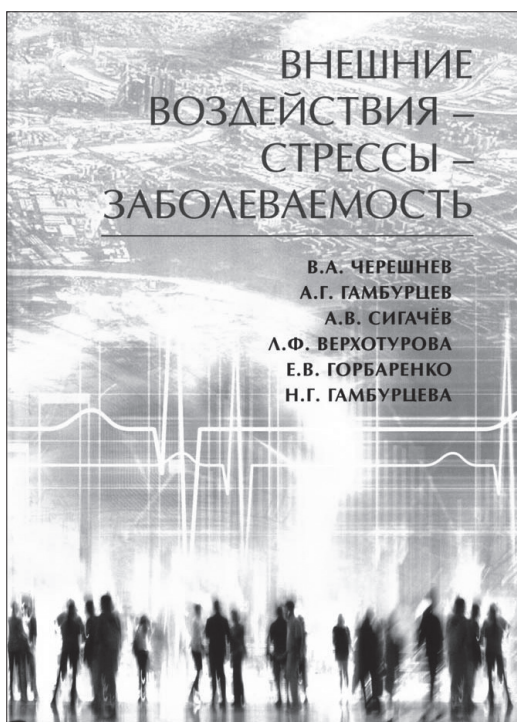
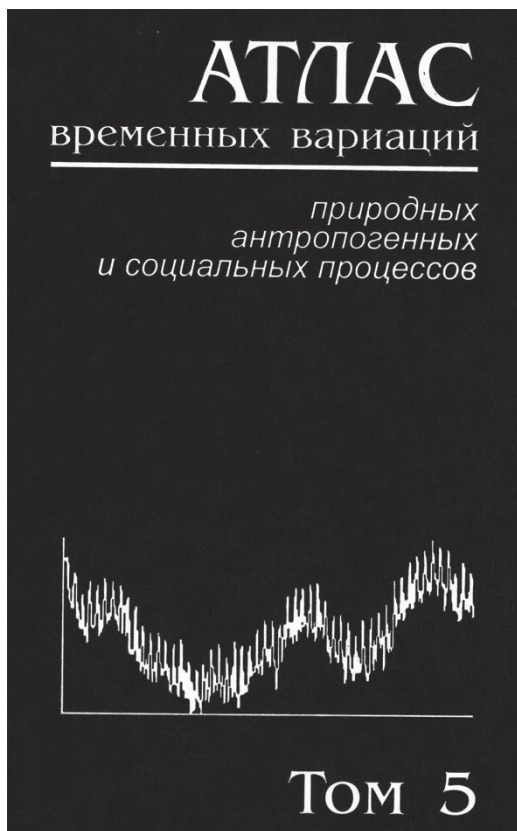
Обложка "Атласа временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов" / Т. 5. Человек и три окружающие его среды (М.: Янус-К, 2013).

процессов в природе и в обществе, определить их сходства и различия, рассмотреть вопрос о воздействии на природные и общественные объекты со стороны окружающих сред и реакцию объектов на эти воздействия».

А.Г. Гамбурцеву пришлось вовлечь в эту работу около сотни ученых, работавших в различных отраслях знаний. Им были сделаны и обоснованы предложения по созданию системы комплексного мониторинга в целях защиты биосферы и населения; они получили поддержку со стороны Совета Безопасности РФ. Эти исследования неоднократно поддерживались грантами РФФИ, программой Отделения наук о Земле РАН "Межгеосферные взаимодействия" и междисциплинарной программой Президиума РАН "Фундаментальные науки – медицине", а также рядом других фундаментальных научных программ.

Работе над "Атласом", кроме профессионализма помогали личностные черты А.Г. Гамбурцева. Всегда открытый для общения, обладающий аналитическим умом, дружелюбный, наделенный чувством юмора, умеющий слушать и слышать не только единомышленника, но и критически настроенного оппонента, Азарий Григорьевич собрал вокруг себя представителей самых разных областей знаний – геофизиков и медиков, географов и экологов, представителей космической медицины и биологов.

Обложка книги В.А. Черешнева, А.Г. Гамбурцева и др. "Внешние воздействия – стрессы – заболеваемость" (М.: Наука, 2016).



В последние годы он активно работал над изучением влияния стрессовых воздействий природной, социальной и антропогенной сред на развитие заболеваний человека. Используя большой объем данных о метео- и геофизической обстановке, он исследовал их корреляции, обращения населения в медицинские учреждения. Некоторые результаты этих работ вошли в одну из последних монографий Азария Григорьевича и его коллег "Внешние воздействия – стрессы – заболеваемость", изданную в 2016 г. Всего А.Г. Гамбурцевым (и при его участии) написано более 300 научных работ, получено 5 патентов.

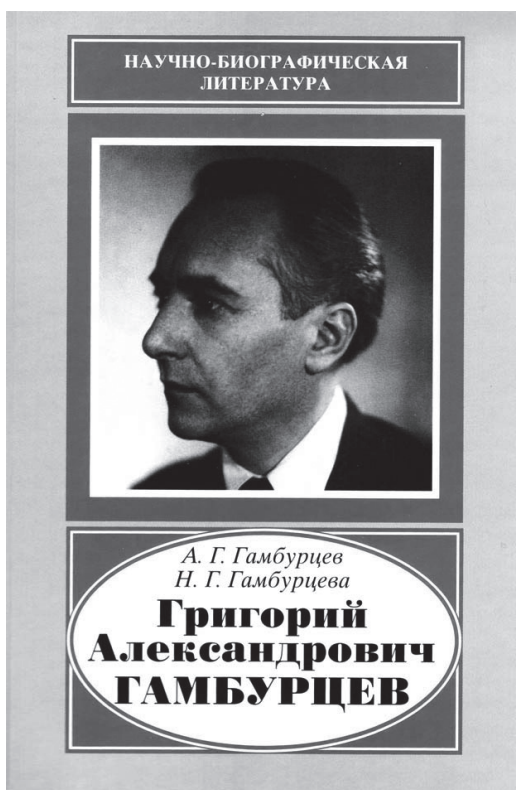
В разные годы Азарий Григорьевич являлся членом научно-технического Совета Государственного Комитета СССР по охране природы; членом экспертного совета по наукам о Земле Высшей аттестационной комиссии России; членом Научного совета Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук РАН по геофизическим методам разведки; заместителем председателя секции геофизической биологии Научного совета по проблемам физики Земли при Отделении наук о Земле РАН; членом Совета Международного фонда Н.Д. Кондратьева; членом Редколлегий журналов "Геофизические процессы и биосфера", "Геофизика" и научного альманаха "Пространство и время"; членом ученого и диссертационного советов ИФЗ РАН. Награжден медалями "Ветеран труда" и "В честь 850-летия Москвы".

Азарий Григорьевич уделял много сил изучению, сохранению научного насле-

Обложка биографического издания А.Г. Гамбурцева, Н.Г. Гамбурцевой "Григорий Александрович Гамбурцев" (М.: Наука, 2003).



дия своего отца, академика Г.А. Гамбурцева, и развитию его идей в современной геофизике. В 2003 году, к 100-летию со дня рождения Григория Александр-



ровича, вышла книга-жизнеописание "Григорий Александрович Гамбурцев", освещающая всю многогранность личности этого выдающегося ученого. Благодаря энтузиазму Азария Григорьевича к 105-летнему и 110-летнему юбилеям отца были изданы книги "Г.А. Гамбурцев. Научное наследие. Малоизвестные работы и материалы" (2007) и "Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века" (2013). В создании последней указанной книги приняли участие многие сотрудники ИФЗ РАН.

В марте 2018 г. А.Г. Гамбурцев сделал интереснейший доклад по случаю 115-летней годовщины академика Г.А. Гам-

бурцева на Ученом совете ИФЗ РАН. Азарий Григорьевич ушел из жизни неожиданно – за два дня до своей кончины он обсуждал с ближайшими коллегами планы на будущее, планировал написание статей, издание следующих томов "Атласа", шутил, был полон оптимизма.

Память об Азарии Григорьевиче Гамбурцеве навсегда останется в стенах Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и в сердцах тех, кому довелось быть с ним рядом.

*По материалам архива  
Института физики Земли РАН*

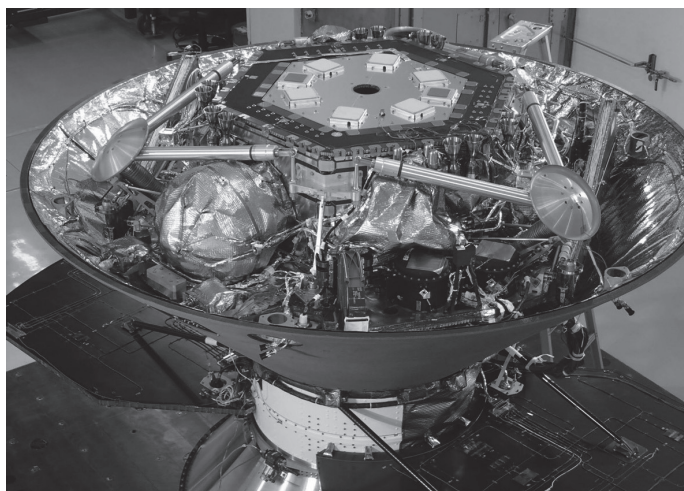
---

## *Информация*

---

### **Запуск и посадка на Марс АМС "Инсайт"**

5 мая 2018 г. с военно-воздушной базы Ванденберг (Калифорния) с помощью ракеты-носителя "Атлас-5" была запущена АМС "Инсайт" ("In-Sight", Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport – исследование внутреннего строения, геодезии и теплообмена; ранее она называлась "GEMS", Geophysical Monitoring Station – станция геофизического мониторинга). Вместе с основным аппаратом к Марсу запустили два кубсата "MarCO-A" и "MarCO-B" (Mars Cube One – один марсианский куб), которые должны регулировать процесс навигации АМС "Инсайт" при полете к Марсу, а



*АМС "Инсайт" во время ее установки на верхнюю ступень ракеты-носителя "Атлас-5". Фото NASA.*

также передавать данные о ее спуске на планету. Малые аппараты "MarCO" размером  $10 \times 10 \times 11,35$  см и массой до 1,33 кг не будут собирать никаких научных данных, их основная задача – проверка миниатюрных технологий

коммуникации и навигации для будущих аппаратов "CubeSat", отправляющихся на другие планеты

На траектории полета к Марсу станция "Инсайт" выполнила шесть коррекций курса. Согласно программе,

26 ноября 2018 г. спускаемый аппарат АМС совершил посадку на поверхности Марса, на нагорье Равнины Элизий. Место посадки определено с помощью камер высокого разрешения АМС "Марсианский орбитальный разведчик" ("MRO"; Земля и Вселенная, 2005, № 6, с. 56). Район посадки (3,0° с.ш., 154,4° в.д.) представляет собой эллипс длиной 130 км с востока на запад и 27 км – с севера на юг.

При создании посадочного модуля станции использованы многие инженерные решения, примененные при создании АМС "Феникс" ("Phoenix"; Земля и Вселенная, 2007, № 6, с. 94; 2008, № 5, с. 108–109), совершившей посадку 25 мая 2008 г. недалеко от северного полюса Марса.

АМС "Инсайт" (масса – 727 кг) состоит из перелетной ступени, аэроболочки с теплозащитой, парашюта и спускаемого аппарата (высота – 1,5 м, размах панелей солнечных батарей – 5,5 м, масса – 360 кг). На перелетной ступени (массой 80 кг) установлены панели солнечных батарей, звездные, солнечные датчики и радиоантенны. Перелетная ступень была сброшена незадолго до входа в атмосферу.

Аэроболочка состоит из теплозащитного щита массой 62 кг и задней части массой 110 кг. Конструктивно она является копией аэроболочки АМС "Феникс". В качестве теплозащиты использовался испаряющийся материал, который применялся на всех американских марсианских

аппаратах (кроме "Кьюриосити"), но большей толщины. На высоте 5,5 км над Марсом был включен посадочный радар; на высоте 1,1 км спускаемый аппарат отделился от верхней части аэроболочки с парашютом и стал спускаться с помощью 12 микродвигателей, работающих в импульсном режиме. Вблизи поверхности произошло торможение, и скорость посадки снизилась до 2,4 м/с. Станция села на марсианскую поверхность.

Спускаемый аппарат АМС "Инсайт" оборудован шестью инструментами и двумя камерами: **сейсмометром SEIS** (Seismic Experiment for Interior Structure – сейсмический эксперимент внутренней структуры) для измерения тектонической активности Марса (создан во Франции при участии Великобритании, Германии и Швейцарии); **зондом HP3** (Heat Flow and Physical Properties Package – набор для изучения теплового потока и физических свойств марсианского грунта), предназначенным для измерения теплового потока из глубин Марса (инструмент должен будет пробурить 5-метровую скважину, что позволит определить, какое количество тепла исходит из внутренних слоев Марса; создан в Германии при участии Польши); **радиолокатором RISE** (Rotation and Interior Structure Experiment – эксперимент вращения и внутренней структуры), который будет измерять мельчайшие отклонения в равномерном вращении планеты – для того, чтобы оценить размер, плотность и состояние вещества внутри ядра

Марса (эксперимент подготовлен Лабораторией реактивного движения NASA); **аппаратура APSS** (Auxiliary Payload Sensor Subsystem – вспомогательная система датчика полезной нагрузки), состоит из набора инструментов, призванных оценивать окружающее пространство вблизи места посадки аппарата (создана в NASA). **Магнитометр** будет измерять величину и направление воздействия магнитного поля в месте посадки; **уголковый отражатель** – с его помощью аппараты будущих миссий смогут с высокой точностью определять положение аппарата на поверхности Марса. Метеостанция предназначена для определения температуры и направление ветра в месте посадки. **Первая фотокамера** с полем зрения 45° сможет производить панорамную съемку и создавать стереоизображения поверхности (аналогична "NavCam" на марсоходах "Спирит", "Опьюнити" и "Кьюриосити"), установлена на штанге; **вторая камера** с аналогичными характеристиками и полем зрения 120°; похожа на камеры марсоходов "HazCam" (установлена на нижней поверхности посадочного модуля), обеспечивая дополнительный вид на места работы инструментов SEIS и HP3. Аппарат оснащен роботизированным манипулятором длиной 2,4 м для переноса инструментов на окружающий ее марсианский грунт.

В течение двух лет (720 земных суток, или 700 солов – марсианских дней) "Инсайт" будет изучать, в основном, внутреннюю структуру Марса (см. стр. 3 обложки, внизу).

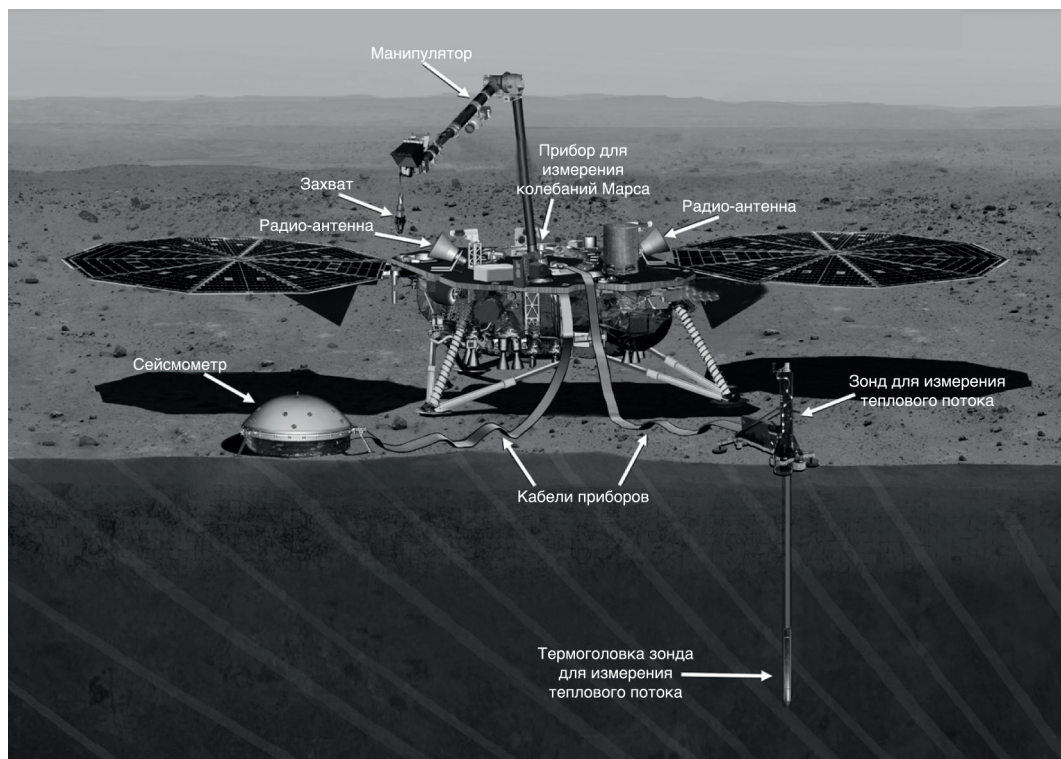


Схема проведения исследований на поверхности Марса спускаемого аппарата АМС «Инсайт» (с указанием расположения систем и научного оборудования). Рисунок NASA.

В список научных задач программы исследований с помощью АМС "Инсайт" входят следующие:

- изучение геологической эволюции Марса, его внутренней структуры и процессов, протекающих в толще марсианского грунта;

- определение размера, состава и агрегатного состояния ядра планеты, толщины и структуры коры, состава и структуры мантии; температуры внутренних слоев грунта Марса;

- изучение современного уровня тектонической активности и частоты падения метеоритов на Марс.

Первые попытки сейсмических исследований на Марсе проводились с использованием сейсмографов на спускаемых аппаратах АМС "Викинг-1" и "Викинг-2" в 1976 г. Однако, на "Викинге-1" этот прибор не заработал после посадки, а на "Викинге-2" – не обладал необходимой чувствительностью, поскольку был установлен не на поверхности Марса, а на спускаемом аппарате.

АМС "Инсайт" оснащена гораздо более совершенной аппаратурой, как ожидается, с ее помощью будут регистрировать как падения метеоритов, так и

процессы, которые происходят в марсианских недрах. Кроме того, на автоматической станции есть аппаратура для замера температуры подпочвенных слоев, а также бур, способный делать отверстия глубиной 6 м. На поверхности станции найдутся средства радиолокации, которые позволят точно измерять параметры движения Марса по орбите. Предполагается, что объем переданной на Землю научной информации достигнет объема до 29 Гбайт.

*По материалам  
JPL и NASA*

## НЕБЕСНЫЙ КАЛЕНДАРЬ: ноябрь–декабрь 2018 г.

Таблица I

### ОСНОВНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ

Дата	Время, ч	Событие
<b>Ноябрь</b>		
6	11	Меркурий в наибольшей восточной элонгации (23°)
7	16	<b>Новолуние</b>
14	3	Венера переходит от попятного движения к прямому
14	15	Луна в апогее
15	14	<b>Луна в первой четверти</b>
16	4	Луна проходит в 2° южнее Марса
17	0	Меркурий переходит от прямого движения к попятному
23	5	<b>Полнолуние</b>
25	8	Нептун переходит от попятного движения к прямому
26	6	Юпитер в соединении с Солнцем
26	12	Луна в перигее
27	9	Меркурий в нижнем соединении с Солнцем
30	0	<b>Луна в последней четверти</b>
<b>Декабрь</b>		
3	21	Луна проходит в 3° севернее Венеры
7	0	Меркурий переходит от попятного движения к прямому
7	7	<b>Новолуние</b>
12	12	Луна в апогее
14	12	Максимум метеорного потока Геминиды
15	2	Луна проходит в 4° южнее Марса
15	11	<b>Луна в первой четверти</b>
15	19	Меркурий в наибольшей западной элонгации (21°)
21	16	Меркурий проходит в 0,8° севернее Юпитера
21	22	<b>Зимнее солнцестояние</b>

22	17	<b>Полнолуние</b>
23	19	Юпитер проходит в 5,2° севернее звезды Антарес ( $\alpha$ Скорпиона)
24	10	Луна в перигее
29	9	<b>Луна в последней четверти</b>

*Примечание.* Во всех таблицах и в тексте дано Всемирное время (UT), кроме особо оговоренных случаев.

Таблица II

## ЭФЕМЕРИДА СОЛНЦА

Дата	$\alpha$		$\delta$		45°		55°		65°	
	ч	м	°	'	восход	заход	восход	заход	восход	заход
					ч:м	ч:м	ч:м	ч:м	ч:м	ч:м
Ноябрь 01	14	24	-14	15	06:39	16:52	07:04	16:27	07:48	15:43
11	15	03	-17	16	06:53	16:39	07:24	16:07	08:23	15:09
21	15	44	-19	48	07:06	16:29	07:44	15:51	08:57	14:38
Декабрь 01	16	27	-21	43	07:19	16:23	08:02	15:40	09:30	14:11
11	17	11	-22	57	07:29	16:21	08:16	15:34	09:57	13:53
21	17	55	-23	26	07:36	16:23	08:24	15:35	10:12	13:48
31	18	39	-23	07	07:39	16:30	08:27	15:43	10:10	13:59

*Примечание.* В таблице дано среднее Солнечное время.

**Пример.** Определить время восхода Солнца 22 ноября 2018 г. в Москве (широта – 55° 45', долгота – 2<sup>ч</sup> 30<sup>м</sup>, 2-я часовая зона – московское время UT + 3<sup>ч</sup>). Пользуясь *Таблицей II*, интерполируем по широте значение времени восхода Солнца на 22 ноября, получаем 07<sup>ч</sup> 50<sup>м</sup>. Вычтем из него долготу места, прибавим 3<sup>ч</sup>, получим 08<sup>ч</sup> 20<sup>м</sup>.

Таблица III

## ЭФЕМЕРИДЫ ПЛАНЕТ

Дата	$\alpha$		$\delta$		m	d	F	Продолжительность видимости для разных широт, ч			Период видимости	
	ч	м	°	'				45°	55°	65°		
<b>Меркурий</b>												
Ноябрь 01	15	52,0	-22	50	-0,2	6,0	0,74	-	-	-	-	
11	16	35,4	-24	44	-0,2	7,2	0,52	-	-	-	-	
21	16	41,1	-23	22	1,5	9,2	0,15	-	-	-	-	

Декабрь	01	15	54,0	-18	17	3,0	9,5	0,06	-	-	-	-
	11	15	46,8	-17	13	-0,3	7,4	0,48	1,2	1,2	-	утро
	21	16	27,6	-20	08	-0,5	5,9	0,76	1,1	0,8	-	утро
	31	17	25,8	-22	57	-0,4	5,2	0,89	-	-	-	
<b>Венера</b>												
Ноябрь	01	13	42,8	-16	09	-4,2	61,1	0,01	-	-	-	-
	11	13	30,9	-12	22	-4,6	55,8	0,08	2,0	2,2	2,5	утро
	21	13	33,6	-10	10	-4,8	48,2	0,17	3,2	3,6	4,4	утро
Декабрь	01	13	49,2	-09	48	-4,9	41,0	0,26	3,9	4,4	5,6	утро
	11	14	14,4	-10	50	-4,8	35,1	0,34	4,2	4,8	6,2	утро
	21	14	46,2	-12	44	-4,7	30,5	0,41	4,3	4,8	6,0	утро
	31	15	23,0	-15	01	-4,6	26,8	0,47	4,2	4,6	5,4	утро
<b>Марс</b>												
Ноябрь	01	21	36,3	-16	42	-0,6	11,9	0,86	6,8	6,6	5,8	вечер
	11	21	58,5	-14	22	-0,4	10,9	0,86	6,9	6,8	6,5	вечер
	21	22	21,5	-11	51	-0,2	10,0	0,86	6,9	7,0	7,1	вечер
Декабрь	01	22	44,9	-09	11	0,0	9,3	0,86	6,9	7,2	7,6	вечер
	11	23	08,7	-06	25	0,1	8,6	0,86	6,9	7,3	8,0	вечер
	21	23	32,7	-03	34	0,3	8,0	0,87	6,7	7,3	8,2	вечер
	31	23	56,9	-00	41	0,4	7,5	0,87	6,5	7,1	8,2	вечер
<b>Юпитер</b>												
Ноябрь	01	15	44,1	-19	04	-1,6	31,3	1,00	-	-	-	-
	11	15	53,1	-19	33	-1,6	31,1	1,00	-	-	-	-
	21	16	02,3	-20	00	-1,6	31,0	1,00	-	-	-	-
Декабрь	01	16	11,6	-20	26	-1,6	31,1	1,00	-	-	-	-
	11	16	21,0	-20	50	-1,6	31,2	1,00	-	-	-	-
	21	16	30,3	-21	12	-1,6	31,4	1,00	1,2	0,9	-	утро
	31	16	39,4	-21	31	-1,6	31,8	1,00	1,8	1,7	-	утро
<b>Сатурн</b>												
Ноябрь	01	18	20,3	-22	47	0,6	15,8	1,00	2,6	1,9	-	вечер
	11	18	24,1	-22	46	0,6	15,6	1,00	2,1	1,5	-	вечер
	21	18	28,3	-22	44	0,6	15,4	1,00	1,6	1,0	-	вечер
Декабрь	01	18	32,8	-22	42	0,5	15,3	1,00	1,0	-	-	вечер
	11	18	37,6	-22	39	0,5	15,2	1,00	-	-	-	-
	21	18	42,6	-22	35	0,4	15,1	1,00	-	-	-	-
	31	18	47,7	-22	30	0,5	15,1	1,00	-	-	-	-

Примечание. Координаты даны на момент 0<sup>ч</sup> по Всемирному времени, F – фаза планеты.



## ВИДИМОСТЬ ПЛАНЕТ

**Меркурий** в ноябре невидим, 27 ноября он окажется в нижнем соединении с Солнцем. В середине декабря ближайшая к Солнцу планета будет видна утром, около 1 часа, в средних и южных широтах нашей страны. Меркурий в период видимости расположен в  $20-21^\circ$  западнее Солнца. 15 декабря он будет в наибольшей западной элонгации ( $21^\circ$ ). 21 декабря Меркурий проходит в  $0,8^\circ$  севернее Юпитера. Блеск планеты в период видимости немного возрастает: с  $-0,3^m$  до  $-0,5^m$ . Видимый угловой диаметр Меркурия уменьшается с  $7,4''$  до  $5,9''$ .

**Венера** после 10 ноября будет видна утром. 14 ноября планета переходит от попятного движения к прямому. Продолжительность видимости Венеры (в зависимости от широты места наблюдения) увеличивается с  $2,0-2,5$  ч в начале видимости планеты, до  $4,3-6,2$  ч в середине декабря, а в конце декабря немного сокращается: до  $4,2-5,4$  ч. Она перемещается по созвездию Девы, затем, с 13 декабря, переходит в созвездие Весов. Венера удаляется от Земли, ее видимый угловой диаметр уменьшается с  $55,8''$  (11 ноября) до  $26,8''$  (31 декабря). Блеск сначала увеличивается с  $-4,6^m$  (11 ноября) до  $-4,9^m$  (1 декабря), затем уменьшается до  $-4,6^m$  (31 декабря). Луна пройдет недалеко от Венеры 3 декабря.

**Марс** виден вечером. Продолжительность видимости красной планеты в северных широтах России увеличивается с  $5,8$  ч (1 ноября) до  $8,2$  ч в (конце декабря), в средних широтах возрастает с  $6,6$  ч (1 ноября) до  $7,1-7,3$  ч (в конце декабря), в южных широтах в ноябре – составляет  $6,8-6,9$  ч, а в конце декабря немного сокращается до  $6,5$  ч. В начале ноября Марс перемещается по созвездию Козерога, 11 ноября он переходит в созвездие Водолея, 22 декабря – в созвездие Рыбы. Планета становится дальше от Земли, ее видимый угловой диаметр уменьшается: с  $11,9''$  (1 ноября) до  $7,5''$  (31 декабря). Блеск Марса снижается с  $0,6^m$  до  $0,4^m$ . Луна пройдет недалеко от Марса 16 ноября и 15 декабря.

**Юпитер** в ноябре не видим. 26 ноября планета-гигант – в соединении с Солнцем. Ут-

ренняя видимость Юпитера в средних и южных районах нашей страны начнется с 20 декабря. Продолжительность его видимости со временем увеличивается: в средних широтах – с  $0,9$  ч (21 декабря) до  $1,7$  ч (31 декабря), в южных широтах – с  $1,2$  ч до  $1,8$  ч. Юпитер перемещается по созвездию Змееносца. 23 декабря планета-гигант проходит в  $5,2^\circ$  севернее звезды Антарес ( $\alpha$  Скорпиона). Блеск Юпитера составит  $-1,6^m$ , видимый угловой диаметр немного возрастает: с  $31,4''$  до  $31,8''$ .

**Сатурн** перемещается по созвездию Стрельца и виден в ноябре, в вечернее время, в средних и южных широтах России, а в самом начале декабря – только в южных широтах. На небосводе планета приближается к Солнцу. Продолжительность видимости Сатурна со временем уменьшается: в средних широтах с  $1,9$  ч (1 ноября) до  $1,0$  ч (21 ноября), в южных – с  $2,6$  ч (1 ноября) до  $1,0$  ч (1 декабря). В декабре планета-гигант уже не видна. Видимый угловой диаметр Сатурна в период видимости уменьшается с  $15,8''$  (1 ноября) до  $15,3''$  (1 декабря), блеск в этот период около  $0,6^m$ .

## МЕТЕОРНЫЙ ПОТОК ГЕМИНИДЫ

14 декабря ожидается максимум метеорного потока Геминиды. Радиант потока расположен в северной части созвездия Близнецов, около двух самых ярких звезд созвездия – Кастора ( $\alpha$  Gem) и Поллукса ( $\beta$  Gem). Он наблюдается 4–17 декабря, его максимум будет 14 декабря 2018 г. в  $12$  ч. Средний радиант потока –  $\alpha = 112^\circ$ ,  $\delta = +33^\circ$ ; скорость метеоров –  $35$  км/с. Поток связан с астероидом 3200 Фаэтон (1983 ТВ). Для наблюдателей в Северном полушарии радиант находится над горизонтом практически все темное время суток. Во время максимума потока Луна находится вблизи первой четверти и немного мешает наблюдениям. Часто встречаются яркие метеоры и болиды. В 2017 г. максимальное зенитное часовое число (ZHR) потока достигло 136 метеоров.

*В.И. ЩИВЬЁВ,  
г. Балашиха  
Московская область*

*Дорогие читатели!*

*Напоминаем, что подписаться на журнал  
"Земля и Вселенная" вы можете с любого  
номера по Объединенному каталогу  
"Пресса России"  
(I полугодие 2019 г.) во всех отделениях связи.  
Подписаться можно и по интернету,  
воспользовавшись каталогом журналов  
на сайте "Почта России".  
Подписной индекс – 70336*

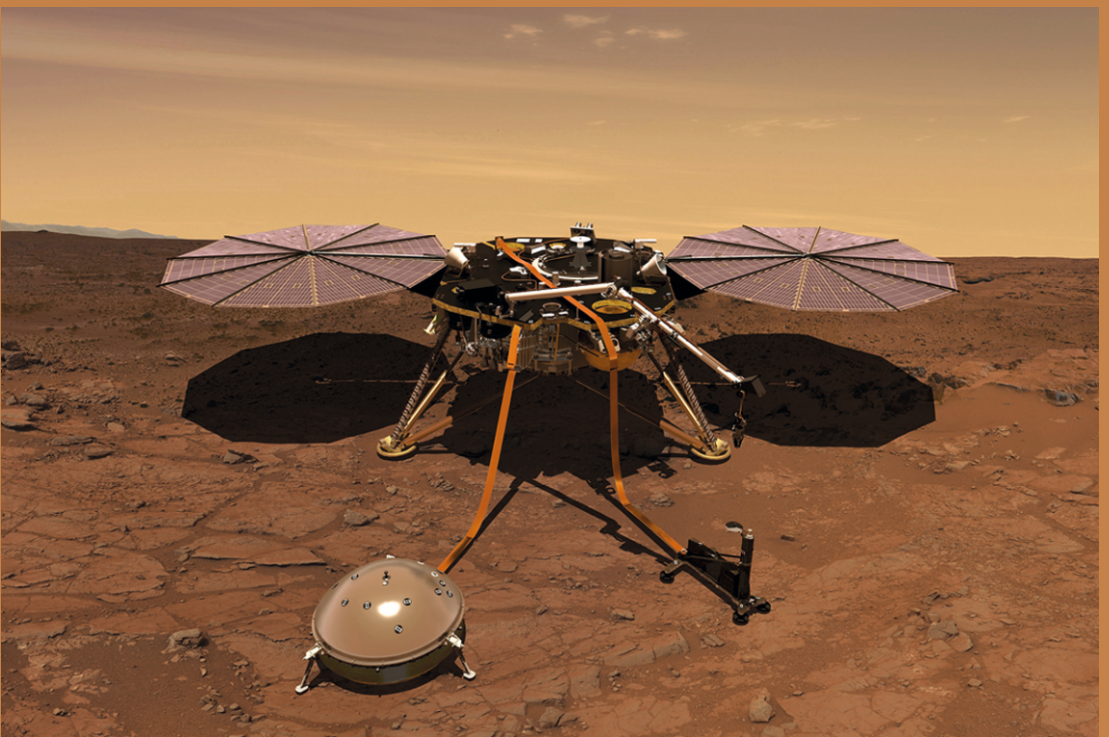
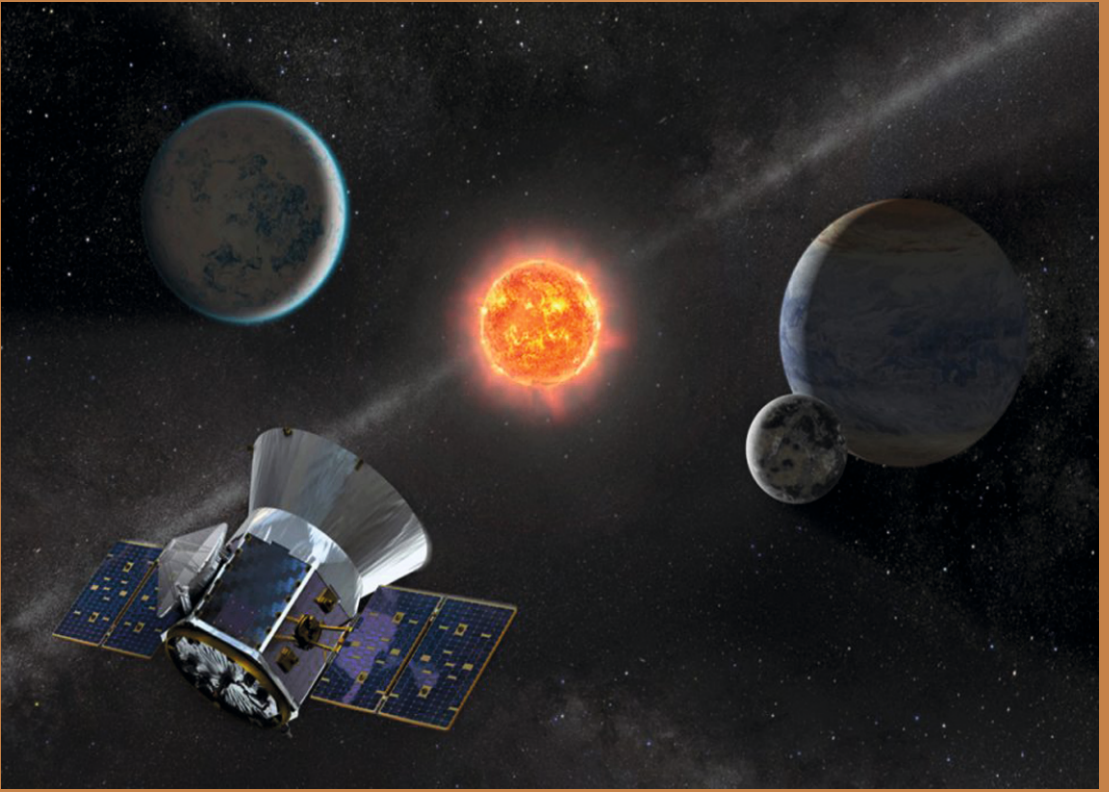
**Литературный редактор** Л.В. Рябцева  
**Зав. отделом космонавтики и геофизики** С.А. Герасютин

**Художественный редактор** О.Н. Никитина  
**Оператор ПК** Н.Н. Токарева  
**Верстальщик** Е.В. Иванова  
**Корректор** О.Н. Добринова  
**Обложку оформила** О.Н. Никитина

Сдано в набор 23.08.2018. Подписано к печати 28.09.2018  
Формат 70 × 100<sup>1/16</sup>; Усл. изд.л. 12,1  
Тираж 250 экз., (включая 5 экз. бесплатно). Зак. 13/5а. Цена свободная

Учредители: Российская академия наук, Президиум  
Издатель: Российская академия наук  
Адрес редакции: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90  
Телефон: (495) 276-77-28 доб. 42-31 или 42-32  
E-mail: zevs@naukaran.com

Исполнитель по контракту № 4У-ЭА-014-18  
ООО «Интеграция: Образование и Наука»  
117418, Москва, Нахимовский проспект, 47  
Отпечатано в ООО «Институт информационных технологий»





Индекс 70336