

УДК 550.36.361

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЛИТОСФЕРЫ И МАНТИИ ЗЕМЛИ – ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИФЗ РАН

© 2019 г. А. О. Глико*, О. И. Парфенюк**

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

**E-mail: gliko@ifz.ru*

***E-mail: oparfenuk@ifz.ru*

Поступила в редакцию 19.06.2018 г.

Принята в печать 15.08.2018 г.

Данная статья посвящена истории развития геотермических исследований в СССР. Подробно описана история лаборатории геотермии в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ) с середины 50-х до середины 80-х годов XX века, когда лаборатория выполняла весь комплекс геотермических исследований, приведены основные результаты с акцентом на работы мирового уровня, выполненные в ИФЗ. Во второй части статьи излагаются основные результаты последнего времени, включая теоретические исследования теплопереноса и численные модели мантийной конвекции.

Ключевые слова: геотермия, плотность потока, тепловые модели, теплопроводность, радиоактивная теплогенерация, конвекция, литосфера

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019128-41>

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое поле Земли в форме проявлений геотермальной активности первым из геофизических полей привлекло внимание человека и стало предметом научных исследований. Измерения температуры в шахтах и рудниках показали, что температура Земли растет с глубиной. Этот факт послужил основой космогонической теории У. Томсона (лорда Кельвина) об остывании Земли из первоначально расплавленного состояния [Thompson, 1862]. Полученная из решения уравнения теплопроводности оценка возраста Земли (несколько десятков миллионов лет) не соответствовала геологическим данным о возрасте пород. Противоречия гипотезы остывания Земли были устранены после открытия явления выделения теплоты при радиоактивном распаде (французские физики П. Кюри и А. Лаворде, 1903) и после того, как Дж. Стратт (лорд Рэлей) в 1906 г. экспериментально установил присутствие радиоактивных элементов во всех исследованных им горных породах [Strutt, 1906]. Он показал, что выделяемое радиогенное тепло является мощным источником, который должен сильно влиять на тепловую историю Земли. В последующие годы (1915–1940) роль радиогенного тепла в истории Земли являлась одной

из центральных тем, обсуждению которой посвятили свои работы такие крупнейшие ученые как А. Холмс, Г. Джеффрис, Б. Гутенберг, Г. Ван Остранд, В.Г. Хлопин.

Исследование теплового режима литосферы и мантии Земли становится одной из основных задач теоретической и прикладной геофизики. Развитие геотермических методов в качестве самостоятельного научного направления относится к середине 1960-х годов, чему способствовали систематические определения плотности теплового потока и сопоставление полученных данных с особенностями строения земной коры. Первые результаты измерений теплового потока на суше опубликованы в 1939 г., на море – в 1946 и 1952 гг. Задержка с измерениями на море была связана с техническими сложностями, преодоленными в 50-х годах английским исследователем Э. Буллардом и его сотрудниками, разработавшими термометрический зонд, погружавшийся в породы океанического дна. В дальнейшем масштабные морские геотермические исследования привели к обнаружению зависимости глубины океана от возраста и убывания плотности теплового потока через дно океанов от возраста океанической коры. Эти зависимости подтверждены различными

моделями остывающей плиты [Langseth et al., 1966; McKenzie, 1967; Parker, Oldenburg, 1973; Davis, Lister, 1974]. Этот факт (характерное уменьшение плотности теплового потока с расстоянием от осевой зоны срединных хребтов) и его объяснение на основе простых тепловых моделей послужили дополнительным подтверждением крупнейшего открытия XX века — глобальной геодинамики, основанной на синтезе идей и достижений геологии и геофизики (в первую очередь, палеомагнетизма).

Поскольку на континентах существенный вклад в плотность теплового потока вносит радиогенная теплогенерация пород верхних слоев коры, более низкие значения плотности теплового потока докембрийских кристаллических щитов (20–49 мВт/м²) по сравнению с более молодыми стабильными структурами протерозойского и палеозойского возраста (40–60 мВт/м²) находят объяснение за счет общего уменьшения мощности источников в результате радиоактивного распада и удаления части радиогенных пород в результате денудации. Высокие значения плотности теплового потока на континентах (100–300 мВт/м² и более), как правило, связаны с магматическими или метаморфическими процессами и отражают взаимодействие континентальной литосферы с конвективной мантией (рифтовые зоны, области внутриплитового магматизма и современного орогенеза). И если на 1993 г. база данных по плотности теплового потока представляла порядка 20 000 значений [Pollack et al., 1993], то общее число измерений по современным опубликованным данным превышает 41 000, среди которых 21 611 — измерения на океанах [Namza, Vieira, 2012]. Последний каталог данных по тепловому потоку содержит свыше 50 000 значений теплового потока [Husterok, 2016; Cermak et al., 2018].

СТАНОВЛЕНИЕ ГЕОТЕРМИИ КАК НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ В РОССИИ

В России развитие геотермии как научного направления было обусловлено практически проблемами изучения и разработки месторождений термальных вод и парогидротерм, а также необходимостью решения различных задач рудной и нефтепромышленной геофизики.

В самом начале XX века в России в Центральном и Западном Предкавказье, Дагестане и на Апшероне были проведены первые систематические геотермические измерения для гидрогеологических и нефтепромышленных целей. Д.В. Голубятников, А.Д. Стопневич, Л.А. Ячевский

проводили исследования с помощью самых простых ртутных термометров, но смогли при этом обнаружить целый ряд интересных и важных явлений, подтвержденных последующими исследованиями. В результате этих работ были выявлены области аномального разогрева земной коры на Апшеронском полуострове и в Центральной части Ставропольского свода. В районе ртутного месторождения в Никитовке было установлено наличие высокотемпературного ореола, вызванного выделением тепла при окислении киновари.

После перерыва, связанного с периодом революции и гражданской войны, прикладная геотермия начинает восстанавливаться в СССР с конца 20-х годов. Следующие 15 лет отмечены бурным развитием геотермических методов и их использованием в отечественной рудной и нефтепромышленной геофизике и в гидрогеологии. Без преувеличения можно утверждать, что в конце 30-х годов геотермические исследования в СССР выходят на самый передовой для того времени уровень. Работы в этой области ведутся в основном в учреждениях Министерства геологии СССР и нефтяных трестах. Подробная сводка основных результатов этого периода приведена в работе С.А. Красковского, работавшего в основном в ЦНИГРИ и много сделавшего для развития геотермии в СССР [Красковский, 1940].

После окончания Великой Отечественной войны начинаются обширные региональные геотермические работы. Большой вклад в изучение гидротермального теплопереноса вносят сотрудники МГУ им. М.В. Ломоносова, МГРИ, лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР и возникшей на ее основе лаборатории геотермии Геологического института АН СССР. Геотермические исследования в ГИН РАН ведутся с 1961 года, когда была создана лаборатория под руководством Ф.А. Макаренко, основной задачей которой было региональное картирование теплового поля на территории СССР (в 1972 г. под редакцией Ф.А. Макаренко опубликована первая Геотермическая карта СССР масштаба 1 : 5 000 000). В последующие годы лабораторию возглавляли В.И. Кононов, Л.Е. Яковлев, а с 2001 г., когда исследования сосредоточились в лаборатории теплопереноса, — М.Д. Хуторской. Среди разносторонних результатов работ лаборатории мировое признание получили определение классической закономерности «тепловой поток — возраст» [Поляк, Смирнов, 1968] и открытие Б.Г. Поляком и В.И. Кононовым (совместно с И.Н. Толстихиным, В. Чермаком и др.) закономерной связи

изотопного состава гелия в подземных флюидах земной коры с региональным тепловым потоком (открытие № 382 реестра Госкомизобретений СССР, 1988 г.), позволяющее ориентировочно оценивать геотермальный потенциал неразбуренных районов. Сотрудники лаборатории первыми выполнили измерения теплового потока с борта подводных обитаемых аппаратов в Тирренском море, Атлантическом и Тихом океанах. В эти же годы в СССР сформировались и другие геотермические центры – в Киеве, Минске, Свердловске, Иркутске, Новосибирске, Петропавловске-Камчатском, Ленинграде, Ташкенте, Ашхабаде, Тбилиси, Махачкале, Южно-Сахалинске. В целом, было выполнено свыше 4000 измерений теплового потока.

В 1937 г. А.Н. Тихонов публикует наиболее строгую в математическом отношении работу, в которой последовательно получены количественные оценки влияния различного распределения радиоактивных элементов на тепловую эволюцию Земли и величину теплового потока в приповерхностном слое [Тихонов, 1937]. С этого времени геотермия на долгое время входит в круг разносторонних научных интересов А.Н. Тихонова. В 1943 г., через шесть лет после этой публикации, О.Ю. Шмидт начал разработку теории происхождения Земли и планет. По мере развития космогонической теории все более ясной становилась необходимость изучения тепловой истории Земли и, в особенности, ее ранней (догеологической) стадии. Эти проблемы стали предметом исследования учеников О.Ю. Шмидта – В.С. Сафронова, Б.Ю. Левина, С.В. Козловской, Е.Л. Рускол, Г.Ф. Хильми и др. Их работы в этой области были пионерскими, а наиболее выдающиеся публикации стали классическими. Для комплексного исследования тепловой истории Земли О.Ю. Шмидт пригласил в 1949 г. на работу в ГЕОФИАН ученицу А.Н. Тихонова Елену Александровну Любимову. Этот выбор оказался в высшей степени верным, и имя Е.А. Любимовой явилось одним из имен, составивших славу Института физики Земли АН СССР.

Этот краткий очерк определяет фон, на котором началось развитие фундаментальных геотермических исследований в ГЕОФИАНе, который стал Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта. У истоков геотермического направления в нашем Институте стояли выдающиеся ученые и организаторы науки академики О.Ю. Шмидт, Г.А. Гамбурцев и А.Н. Тихонов. Исследования теплового поля Земли в ИФЗ АН СССР сформировались на основе двух направлений – теоретического (его инициатором был О.Ю. Шмидт) и экспериментального (здесь инициатором был Г.А. Гамбурцев).

Можно считать, что развитие в СССР теоретической геотермии началось с упомянутой выше работы А.Н. Тихонова, в которой получены детальные количественные оценки влияния различного распределения радиоактивных элементов на тепловую эволюцию Земли и величину теплового потока в поверхностном слое [Тихонов, 1937]. При удивительном многообразии исследований по проблемам из самых разных областей математики и физики А.Н. Тихонов выполнил и ряд основополагающих исследований в области геофизики – отдельное издание его основных трудов по геофизике содержит 66 работ [Тихонов, 1999]. Огромный вклад в развитие геотермии внесла Е.А. Любимова, выполнив целый ряд работ по тепловой истории Земли, исследованию физической природы источников тепла и механизмов теплопереноса в недрах Земли (см. [Глико, Парфенюк, 2015]).

ИСТОРИЯ ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ЛАБОРАТОРИЯ ГЕОТЕРМИИ) В ИФЗ

Теперь об организации экспериментальных и полевых работ в геотермии. В 1946 г. Постановлением ЦК ВКП(б) и Правительства в Академии наук была создана специальная Геофизическая комплексная экспедиция (ГКЭ) для выполнения научно-исследовательских и опытно-производственных геофизических работ на предприятиях, ведущих разведку и добычу радиоактивных руд. Начальником ГКЭ был назначен академик Г.А. Гамбурцев. По его приказу в том же году в ГКЭ создается геотермическая группа и в нее зачисляется И.Д. Дергунов, который и явился организатором экспериментальных геотермических исследований. Иван Давыдович Дергунов был профессиональным теплофизиком и экспериментатором. Он окончил в 1936 г. физический факультет МГУ и защитил там же в 1940 г. кандидатскую диссертацию по исследованию упругих и вязкостных свойств металлов при высоких температурах. В период с 1941 по 1946 гг. И.Д. Дергунов работал на мерзлотной станции Сковородино, где изучал особенности термического режима и тепловых свойств вечномёрзлых грунтов и пород. В 1946 г. по запросу Президента АН СССР С.И. Вавилова он откомандировывается в Институт теоретической геофизики АН СССР для организации экспериментальных геотермических исследований. В архиве ИФЗ РАН сохранилась замечательная научная характеристика И.Д. Дергунова, написанная рукой академика (в то время член-корреспондента АН СССР), заместителя

директора Института теоретической геофизики А.Н. Тихонова. Можно предположить, что именно А.Н. Тихонов, всегда проявлявший большой интерес к проблемам геотермии (интересно, что в 1939 г. он опубликовал работу по тепловому режиму мерзлотной Сковородинской скважины [Тихонов, 1939]) и впоследствии в течение многих лет возглавлявший Научный Совет АН СССР по геотермическим исследованиям, способствовал переходу И.Д. Дергунова в АН СССР. И.Д. Дергунов внес большой вклад в решение прикладных задач, стоявших перед ГКЭ: в 1950–1952 гг. он был заместителем начальника ГКЭ по научной части.

Лаборатория геотермии (теперь теоретической геофизики) ведет свою историю с 1952 г., когда лаборатория И.Д. Дергунова в качестве геотермической группы переводится в отдел электромагнитных методов разведки ГЕОФИАНа. И.Д. Дергунов и в дальнейшем сохранял интерес к вопросам практической геотермии и проводил полевые работы на ряде месторождений. Но его основной интерес переключается на разработку аппаратуры и методики глубинных скважинных измерений температуры и лабораторных измерений теплофизических свойств горных пород с целью определения величины глубинного теплового потока. В то время это была совершенно новая задача, с которой он блестяще справился. И.Д. Дергунов разработал и детально обосновал методику высокоточных измерений в скважинах, сконструировал и изготовил электрический термометр сопротивления, позволявший измерять

температуру вплоть до значений 250 °С при давлениях, превышающих 600 атм. [Дергунов, Горожанкин, 1954; Дергунов, 1959]. С помощью этого прибора И.Д. Дергуновым, Ф.В. Фирсовым и Л.Н. Люсовой были выполнены измерения в скважинах района Кавказских минеральных вод и на побережье Черного моря, на территории Краснодарского и Ставропольского края, Сумской и Полтавской областей УССР [Любимова и др., 1964]. В 50-е годы в геотермической группе разрабатывается методика измерений тепловых свойств (теплопроводности и температуропроводности) горных пород, создаются установки для измерения этих свойств в лабораторных и полевых условиях. Таким образом, была заложена база для определения тепловых потоков. Реализовать все планы И.Д. Дергунову не удалось – он умер в 1957 году в возрасте 54 лет. К этому времени экспериментальная группа в составе Ф.В. Фирсова, Г.Н. Стариковой, Л.Н. Люсовой, А.П. Шушпанова была хорошо оснащена, и экспериментальные исследования, проводившиеся этой группой, отвечали самым высоким требованиям.

Выход геотермических исследований в ИФЗ на мировой уровень связан с именем выдающегося ученого, разностороннего теоретика и умелого организатора Е.А. Любимовой (рис. 1). В 1957 г. Елена Александровна Любимова приняла руководство геотермической лабораторией и почти 30 лет обеспечивала ее лидерство в отечественной и мировой науке. С ее именем связано проведение



Рис. 1. Е.А. Любимова с главным редактором журнала «Физика Земли» академиком В.А. Магницким.

геотермических исследований как на континентах, так и на океанах.

К 1970 г. лаборатория представляла собой сильный и многочисленный коллектив, способный выполнять как теоретические, так и экспериментальные исследования по геотермии. в состав лаборатории входили Ф.В. Фирсов, Г.Н. Старикова, Л.Н. Люсова, А.П. Шушпанов, В.Н. Никитина, И.М. Кутасов, М.К. Тарасова, А.Н. Тарасов, А.А. Лопатин, А.В. Ефимов, В.А. Шелягин, Г.А. Томара, Н.А. Денискин, В.А. Бычков, Е.В. Смирнова. Чуть позднее в эту лабораторию поступили В.С. Фирсова, В.И. Власенко, Н.И. Аршавская, И.С. Фельдман, Е.Б. Копербах, Рогачева Л.Е., а затем Е.И. Суетнова, О.И. Парфенюк, С.Ю. Милановский, А.Г. Сальман.

Е.А. Любимова закончила физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, и А.Н. Тихонов рекомендовал ее О.Ю. Шмидту как одну из способнейших своих учениц. В 1949 г. Елена Александровна пришла работать в Институт физики Земли (тогда ГЕОФИАН) и трудилась в нем всю жизнь. в первый период своей яркой научной жизни (примерно до середины 60-х) Е.А. Любимова выполняет ряд выдающихся работ по тепловой истории Земли, исследованию физической природы источников тепла и механизмов теплопередачи в недрах Земли [Любимова, 1952; 1953; 1963; Lubimova, 1958]. В 1968 г. выходит в свет ставшая классическим трудом и настольной книгой нескольких поколений геофизиков монография «Термика Земли и Луны» [Любимова, 1968].

С начала 60-х годов под руководством Е.А. Любимовой организуются широкие по своему охвату определения тепловых потоков на суше (включая измерения в Кольской сверхглубокой скважине) и на море. Разработка погружных термоградиентографов (ПТГ) началась в 1964 г. [Любимова и др., 1966]. Первые донные исследования были выполнены на озере Байкал. В дальнейшем усилиями Г.А. Томара, А.Л. Александра и А.Д. Дучкова (последние двое были аспирантами Е.А. Любимовой) была создана одна из лучших для своего времени моделей ПТГ-3М. Этим прибором Г.А. Томара впервые провел с дрейфующих льдов (станция СП-15) измерения тепловых потоков на дне Северного Ледовитого океана. Впоследствии В.А. Бычков, В.И. Власенко и Г.А. Томара выполнили с дрейфующих льдов определения тепловых потоков более чем на 40 станциях в различных районах

Северного Ледовитого океана. В 1968 г. впервые были выполнены такие измерения в рифтовой долине срединного арктического хребта Гаккеля, где было установлено сходство профиля теплового потока с профилями, характерными для Срединно-Атлантического хребта. В последующие 15 лет измерения тепловых потоков были выполнены на Каспийском, Черном, Охотском морях, на озере Иссык-Куль, а также (в результате экспедиций НИС) в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах [Любимова и др., 1973; 1976].

Е.А. Любимова была одним из основателей международной Комиссии по тепловому потоку (IHFC) при МАСФЗН (IASPEI), и в период с 1967 по 1979 г. избиралась ее председателем (см. статью к 55-летию юбилею IHFC [Сернак et al., 2018]). Эта деятельность в большой мере способствовала укреплению престижа советской науки.

Большой вклад в развитие геотермических исследований внесли ближайшие ученики Е.А. Любимовой – ныне ведущие научные сотрудники ИФЗ РАН О.И. Парфенюк, Е.И. Суетнова, С.Ю. Милановский, а также последние ее аспиранты: Р.-М. Проль-Ледесма из Мексики и А.Ш. Мухтаров из Азербайджана (ныне доктор наук, заведует лабораторией геотермии Института геологии и геофизики НАН Азербайджана).

В 1985 г. после смерти Е.А. Любимовой директор ИФЗ академик М.А. Садовский предложил одному из авторов статьи – А.О. Глико – занять должность руководителя лаборатории. к этому времени А.О. Глико в течение ряда лет успешно разрабатывал проблему утонения литосферы в результате ее взаимодействия с аномально горячей мантией. К исследованиям лаборатории присоединились чл.-корр. РАН Е.В. Артюшков (ныне академик РАН), М.А. Беэр, А.П. Трубицын, П.А. Чехович, А.Г. Петрунин, Д.В. Парсегов. В 1986–1990 гг. предпринимались попытки оживить экспериментальные исследования: были проведены измерения тепловых потоков в двух рейсах НИС (в Центральной Атлантике и Западной части Тихого океана), ставились режимные геотермические наблюдения на Джавахетском нагорье в Грузии в связи с поиском предвестников землетрясений. Но в силу известных внешних причин сохранить данные направления не удалось, и с начала 90-х лаборатория сконцентрировалась на теоретических исследованиях. В фокусе естественным образом оказались процессы тепломассопереноса в литосфере

и мантии Земли, определяющие формирование и эволюцию геологических структур различного масштаба (континентальные рифтовые зоны, области внутриплитового магматизма, области регионального метаморфизма и зоны глубинных надвигов, осадочные бассейны, магматические и гидротермальные системы).

В 2014 г. к лаборатории теоретической геофизики присоединился коллектив исследователей, возглавляемый чл.-корр. РАН В.П. Трубицыным. Проблематика исследований теплового режима литосферы и мантии Земли расширилась и теперь включает исследования различных аспектов конвекции в мантии для объемной трехмерной Земли и для протяженных двумерных структур [Трубицын, Трубицын, 2014; 2015; Trubitsyn, Evseev, 2016].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАБОРАТОРИИ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ

Усилия сотрудников лаборатории объединяет основная цель – построение количественных эволюционных моделей процессов, в той или иной степени связанных с тепломассопереносом, позволяющих объяснить наблюдаемые явления и прогнозировать поведение указанных геологических систем. Методами исследования являются численное моделирование на основе методов конечных элементов и конечных разностей, итерационные численные методы, а также аналитические асимптотические оценки.

Данный краткий обзор основных результатов естественно начать с проблем моделирования наиболее масштабных конвективных процессов в мантии Земли. Модели мантийной конвекции дают основу для понимания процессов формирования глобальных тектонических структур и эволюции Земли. Основные трудности моделирования конвекции в мантии связаны с экспоненциальной зависимостью вязкости мантийного вещества от температуры, сильной нестационарностью течений при числах Рэлея порядка 10^6 – 10^7 , необходимостью учитывать взаимодействие плит с мантийными течениями и их влияние на тепловое состояние мантии. При этом, модели мантийной конвекции должны согласовываться с особенностями реальных геофизических полей и геохимическими данными о перемещении вещества и существовании достаточно обособленных геохимических резервуаров. В результате многолетних исследований В.П. Трубицыну удалось решить ряд очень

сложных проблем. В качестве квинтэссенции этих результатов мы приводим рис. 2, иллюстрирующий численную модель конвекции в нагретой сфере с параметрами современной Земли. Эта модель впервые воспроизводит все принципиальные структуры мантии, поле температур и картину мантийных течений. Модель, в частности, объясняет формирование геофизического резервуара, питающего хребты обедненным веществом, и показывает влияние распределения вязкости, наличия континентов и океанических плит на структуру мантийных течений (рис. 2). Во всех существующих моделях конвекции мантийные плюмы воспроизводятся в виде непрерывных восходящих конвективных струй горячего вещества. В результате расчетов, специально выполненных для детализации структуры плюмов, выявлен режим тепловой конвекции в мантии, при котором мантийные плюмы доставляют к поверхности горячее вещество не непрерывно, а порциями с периодами от сотен тысяч до десятка млн лет, что соответствует данным о периодичности катастрофических извержений в истории Земли [Евсеев, Трубицын, 2017; 2017a]. На этой основе получает объяснение природа существования цепочек вулканических островов, связанных с периодичностью действия плюмов.

В качестве подтверждения и иллюстрации взаимодействия мантийного плюма и литосферы, а также проявления мантийных плюмов на поверхности исследовано формирование магматической системы Йеллоустоун (Yellowstone). Результаты моделирования приводят к заключению, что в настоящее время эта система находится в состоянии угасающей активности, которая далека от начала кальдерообразующего извержения. Возможно, сейчас происходит переход к новой локализации вулканической активности, связанной с движением североамериканской плиты над плюмом [Simakin, Ghassemi, 2018].

Важнейшей проблемой современной геодинамики является обоснование физического механизма, способного удовлетворительно объяснить масштабы, скорость и амплитуды новейших поднятий в кратонных областях и образования осадочных бассейнов. В сверхглубоких осадочных бассейнах мощность осадков достигает 15–20 км. Совместный анализ данных ГСЗ о строении их коры и гравиметрических данных показывает, что под разделом Мохо во впадинах залегают эклогиты со скоростями продольных волн, близкими к скоростям в мантийных перидотитах. Во впадинах проявлялось

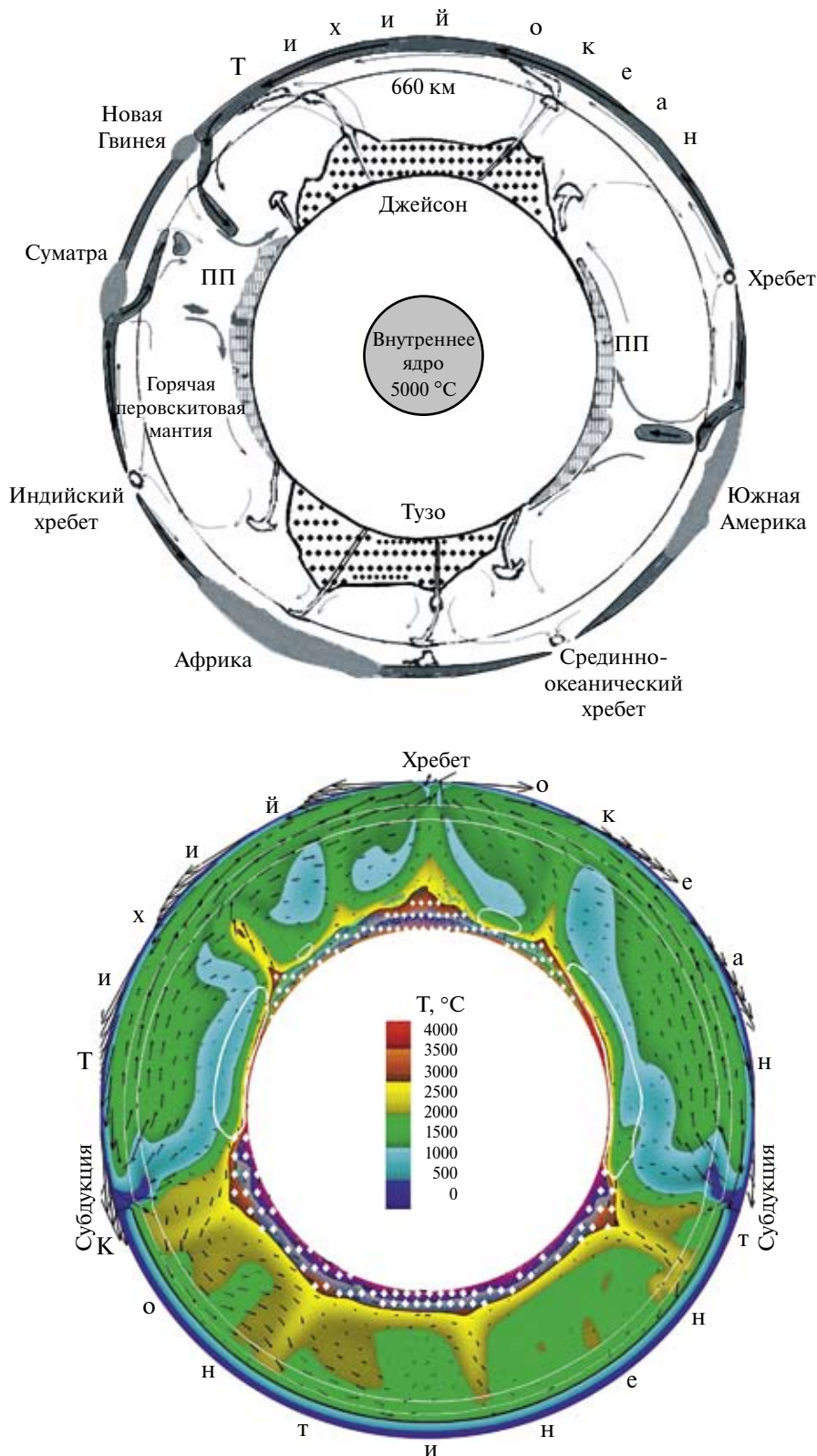


Рис. 2. Схематическая картина строения современной Земли, построенная по данным сейсмической томографии и петрологии – верхний рисунок. Внизу – одна из стадий рассчитанной структуры конвекции в сферическом слое вязкой мантии с учетом зависимости вязкости от температуры и влияния фазовых переходов. Скопления минеральных фаз высокого давления на дне мантии показаны ромбиками, температура – цветом, скорости – стрелками, фазовые границы – белыми линиями [Евсеев, Трубицын, 2017].

лишь умеренное растяжение коры, и их формирование было обусловлено, главным образом, преобразованием габброидов в нижней части континентальной коры в тяжелые эклогиты, которое происходило эпизодически в ходе инфильтрации в нижнюю кору мантийных флюидов. Его осуществлению способствовало повышение давления в нижней коре при накоплении осадков. При повышении температуры и давления под мощным слоем осадков в сиалической верхней коре развивался умеренный метаморфизм. В высокожелезистых метаосадочных породах глубокий метаморфизм приводил к повышению плотности и скорости продольных волн до значений, характерных для коры океанического типа [Артюшков и др., 2013; 2014].

За последние несколько миллионов лет на большей части площади континентов резко ускорились процессы поднятия земной коры, в результате которых образовалось большинство современных горных хребтов, высоких плато, кристаллических щитов и других положительных морфоструктур [Карта..., 1997; Неотектоническая..., 1981]. По объему сформированного рельефа это самое мощное явление в континентальной литосфере. На 69% площади континентов залегает кора докембрийского возраста [Моoney, 2015]. Наиболее популярный механизм поднятий, горизонтальное сжатие, для докембрийской коры не применим, поскольку она образовалась полмиллиарда лет назад или раньше. В качестве причины образования поднятий предложено разуплотнение пород в земной коре вследствие ретроградного метаморфизма при поступлении в кору мантийных флюидов [Артюшков, 2012; Артюшков, Чехович, 2014; 2016; 2017].

Докембрийские кратоны часто считаются спокойными в тектоническом отношении. Поэтому вероятность сильных землетрясений в таких областях оценивается как очень невысокая. Даже на Восточно-Европейской платформе, на основной части которой новейшие поднятия составляют лишь 100–200 м, существует ряд областей с высокими градиентами вертикальных смещений коры, как например, на Приволжской возвышенности (рис. 3). В нескольких районах новейшие вертикальные смещения коры изменяются на сотни метров на расстояниях в несколько десятков километров. Вертикальные смещения коры в этой области достигают 600–700 м, но в результате интенсивной поверхностной денудации высота рельефа оказалась небольшой. В связи с резким оживлением в новейшую эпоху поднятий земной коры,

указывающих на инфильтрацию в литосферу мантийных флюидов, на Восточно-Европейской платформе возможны сильные землетрясения. Полученные данные свидетельствуют о том, что в современную эпоху докембрийские кратоны, занимающие основную часть площади континентов, не являются структурами, спокойными в тектоническом отношении. Они испытывают значительные, неоднородные на площади деформации литосферы. Их изучение представляет интерес как с фундаментальной, так и с практической точки зрения.

Одна из центральных и до конца нерешенных проблем связана с механизмами формирования структуры литосферы континентальных рифтовых зон и областей внутриплитового магматизма. Необходимо объяснить быстрое замещение нижних слоев литосферы горячим (перегретым по отношению к стандартной мантии) веществом мантии. В большинстве случаев характерное время составляет первые десятки миллионов лет. В принципе, такое замещение может происходить либо путем удаления вещества литосферы по мере его прогрева (т. н. конвективное утонение), уменьшающего вязкость вещества, либо путем развития процесса гравитационной неустойчивости, скорость которого может возрастать при формировании трещин и поступления по ним мантийного вещества или продуктов плавления. Оценки возможности реализации такого сценария достаточно неопределенны. В любом случае, исследования конвективного механизма утонения литосферы позволили получить оценки необходимых величин потоков тепла, которые можно считать оценками сверху. Проблема конвективного утонения литосферы была исследована всесторонне – сначала в линейном приближении [Глико, Ефимов, 1978], а затем в полной нелинейной постановке [Gliko et al., 1985; Gliko, Mareschal, 1989; Mareschal, Gliko, 1991]. Было определено соотношение между величиной потока тепла, подводимого к подвижному основанию литосферы, и скоростью формирования ловушки, справедливое на временах, малых по сравнению со временем кондуктивного прогрева литосферы. Это соотношение, а также численный метод использовались для оценки потоков тепла, необходимых для формирования структуры литосферы Кенийского рифта по отражающим ход утонения литосферы петрологическим данным, приведенным в работе [Wendlandt, Morgan, 1982]. Средняя величина необходимого потока тепла составила примерно 80 мВт/м². Численное решение обратной задачи по исходным данным Вендландта

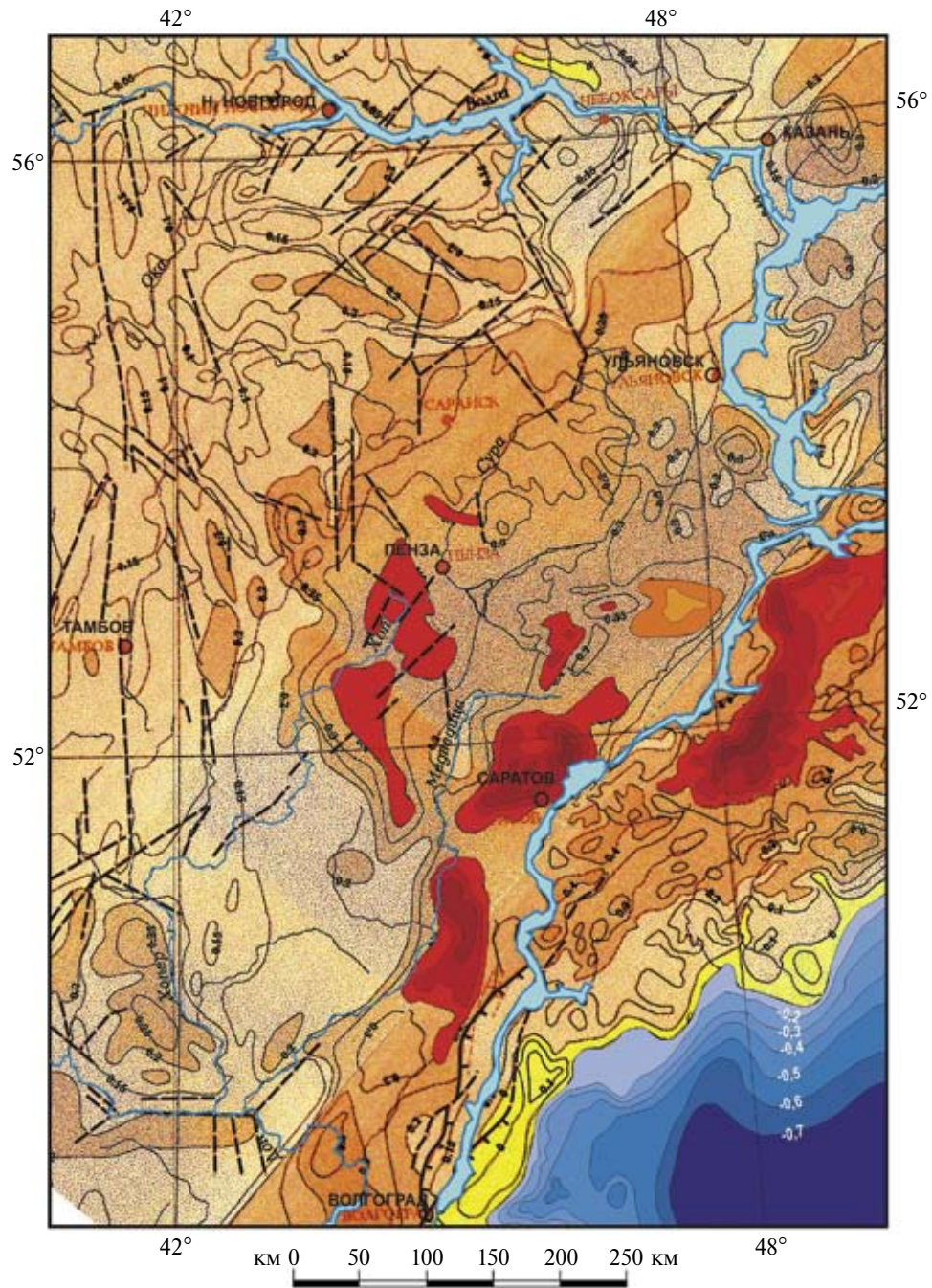


Рис. 3. Новейшие поднятия коры в юго-восточной части Восточно-Европейской платформы по [Карта..., 1997, с изменениями]: 1 – изолинии амплитуд вертикальных тектонических движений, км; 2 – разрывные нарушения неустановленной природы; 3 – сбросы.

и Моргана показало, что в этом сценарии поток тепла на границе литосферы резко возрастает до $80\text{--}85\text{ мВт/м}^2$ и затем медленно убывает в течение 25 млн лет до значения 50 мВт/м^2 . Построенные модели нестационарного теплового режима континентальной литосферы применялись в дальнейшем для исследования процессов метаморфизма в нижней и средней коре.

Получен целый ряд интересных результатов в области исследования тепловой эволюции и истории деформаций коллизионных структур, сформированных по механизму надвига. Комплексная модель тепловой и динамической эволюции области надвига для реологически расслоенной литосферы включает разбитую на блоки жесткую верхнюю кору, нижнюю кору и литосферную верхнюю мантию, которые различаются значениями эффективной вязкости. Задача решается методом конечных элементов с использованием сетки, деформируемой во времени (метод Лагранжа). Горизонтальное сокращение коры сопровождается надвигом вдоль разлома блоков верхней коры вдоль наклонной зоны нарушений, появлением дополнительной нагрузки на слои, лежащие под этой зоной, и эрозией образующихся покровов. Эти процессы компенсируются вязкими течениями на глубинах нижней коры и верхней мантии [Parphenuk et al., 1994; Парфенюк, Марешаль, 1998].

Дальнейшее развитие этого направления состояло в оценке влияния значений теплогенерации и теплопроводности верхней коры на тепловую структуру надвиговых структур в связи с определением возможности формирования гранитных расплавов [Парфенюк, 2005; Parphenuk, 2015; 2016].

Расчеты с различными значениями теплогенерации и коэффициента теплопроводности верхней коры показали возможность формирования области частичного расплава на глубинах $30\text{--}40\text{ км}$ в различные моменты времени. Для заданного множества теплофизических параметров рассчитанный диапазон максимальных температур составляет $590\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$ (от начальной $460\text{ }^\circ\text{C}$ на глубине 20 км) и $670\text{--}885\text{ }^\circ\text{C}$ (от начальной $610\text{ }^\circ\text{C}$ на глубине 30 км) после горизонтального сокращения на 100 км за 20 млн лет . Дальнейшая скорость повышения температуры в течение 42 млн лет постколлизийной эволюции много меньше, что демонстрирует важную роль начальной фазы нагрева в ходе медленного надвига и формирования утолщенной коры. Расчеты показали, что при среднеконтинентальной начальной температуре подавляющее большинство

моделей обеспечивает возможность появления частичного расплава «влажного» гранита. Зона превышения температуры солидуса «влажного» гранита возникает на уровне нижней коры, и после окончания сокращения и надвига верхняя граница области плавления поднимается до глубины $15\text{--}20\text{ км}$. Зона частичного расплава постепенно расширяется и захватывает область перед фронтом надвига из-за утолщения коры и наличия горизонтального теплопереноса и охватывает на постколлизийной стадии область протяженностью $150\text{--}200\text{ км}$. Повышение температуры может быть весьма значительным (до $320\text{ }^\circ\text{C}$) на уровне глубин $10\text{--}30\text{ км}$.

Изучена эволюция теплопотерь на стадии движения надвига и после его остановки. Величина плотности теплового потока падает примерно на 10 мВт/м^2 над разломом, вдоль которого происходит процесс надвигания. Ранняя постколлизийная стадия характеризуется некоторым увеличением теплового потока из-за увеличения мощности верхней коры, в которой теплогенерация максимальна. Далее тепловой поток выходит на стабильные значения, т. к. перераспределение дополнительной нагрузки в результате эрозии поднятия и осадконакопления весьма незначительно на этой стадии из-за локального характера эрозии, предполагаемого в модели. Максимальные значения плотности теплового потока наблюдаются во фронтальной области надвига и составляют на постколлизийной стадии $85\text{--}95\text{ мВт/м}^2$ при региональных фоновых значениях $50\text{--}70\text{ мВт/м}^2$. Впервые показано, что теплопотери с поверхности после окончания сокращения коры сильнее зависят от значений теплогенерации, чем от величины теплопроводности верхней коры (рис. 4).

Нестационарные тепловые модели литосферы лежат в основе изучения различных аспектов формирования осадочных бассейнов. В последние годы разработана математическая модель взаимосвязанных процессов уплотнения осадков, фильтрации насыщающих флюидов и аккумуляции газовых гидратов в морских осадках в процессе накопления слоев осадков с различными реологическими и флюидодинамическими свойствами при образовании морских осадочных бассейнов. Сделан вывод о ключевой роли изменения вязкости формирующихся слоев осадков в динамике изменения скорости флюида и аккумуляции газовых гидратов. Результаты моделирования накопления газовых гидратов в морских осадках показали, что механические и гидродинамические процессы в слоях осадков, происходящие

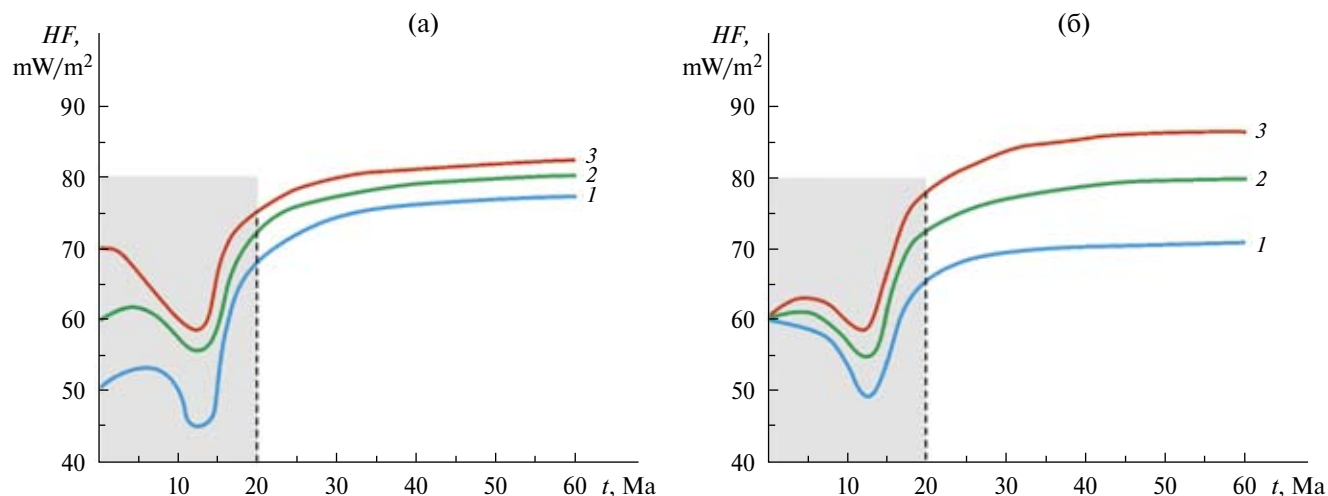


Рис. 4. Эволюция теплового потока с поверхности над срединной точкой разлома, по которому происходит надвиг: (а) – варианты с различными значениями теплопроводности: 1–2.0; 2–2.5; 3–3.0 Вт/м·К при среднем значении теплогенерации 2.0 мкВт/м³; (б) – влияние различной скорости теплогенерации: 1–1.5; 2–2.0; 3–2.5 мкВт/м³ при среднем значении теплопроводности 2.5 Вт/м·К. Затененная область – время надвига, светлая – постколлизийная стадия [Parphenuk, 2016].

в течение уплотнения накапливающихся осадочных слоев с различными реологическими и флюидодинамическими свойствами, могут быть одной из причин перемещения положения границы устойчивости газовых гидратов (BSR) в ходе истории формирования осадочной структуры. Различие вязкости и проницаемости поступающих в осадочный бассейн осадков может приводить к смещениям положения BSR на 150 м с сохранением палео BSR на продолжительное время (порядка 10^4 лет).

Разработана модель, теоретически обосновывающая механизм образования значительных объемов газовых гидратов, ассоциированных с подводными грязевыми вулканами. Согласно этой модели скорость накопления гидратов в зоне их термобарической стабильности зависит от гидродинамических и физических свойств осадков над питающим резервуаром, их пористости и от температурного градиента в осадках, давления в резервуаре питания и его глубины от поверхности, глубины дна. Математическая модель иллюстрирует количественно процесс накопления газовых гидратов в зонах разгрузки флюидов, ассоциированных с грязевыми вулканами. Показано, что максимальная скорость гидратонакопления составляет 2.6% порового пространства за 100 лет при проницаемости осадков 10^{-14} м², градиенте температуры 0.05° Км⁻¹, глубине питающего резервуара 1000 м от поверхности дна и глубине моря 1200 м. Такая скорость гидратонакопления может обеспечить за сотни лет значительную гидратонасыщенность

в окрестностях грязевых вулканов, соответствующую наблюдаемым данным [Суетнова, 2014; 2016; Жостков и др., 2017].

Моделирование процессов гидротермального теплопереноса также составляет одно из направлений, по которому были получены важные результаты. Это касается построения модели теплопереноса в системах черных курильщиков [Глико, Петрунин, 1996] и полученными оценками жизни высокотемпературных гидротермальных систем дна океанов, которое определяется начальным запасом тепла в резервуаре и скоростью теплообмена в системе. Однако отдельные курильщики существуют в течение гораздо более короткого времени вследствие процессов осаждения различных компонентов из гидротермального раствора (в первую очередь, кремнезема) и залечивания соответствующего канала/трещины. Процесс залечивания вследствие процессов осаждения был исследован как для отдельной трещины, так и для системы плоско-параллельных трещин [Глико, 2002]. Определены основные сценарии залечивания системы трещин и характерные времена процесса, зависящие от времени теплообмена между соседними трещинами и кинетическими параметрами, контролирующими скорость осаждения [Глико, 2005]. Показано, что именно процессы залечивания определяют короткое время существования курильщиков (порядка 1–3 лет).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тепло обеспечивает энергией все геофизические и геологические процессы, поэтому экспериментальные и теоретические геотермические исследования сохраняют свою актуальность [Davis, Chapman, 2011; Jaupart, Mareschal, 2011; 2011a; Cermak et al., 2018]. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН вносит свой вклад в решение задач современной геофизики — изучение процессов теплопереноса, происходящих в земной коре, литосфере и мантии Земли в различных геодинамических обстановках и играющих определяющую роль в формировании и эволюции структур различного масштаба (мантия Земли, литосфера, земная кора, зоны глубинных надвигов, континентальные поднятия, осадочные бассейны в процессе отложения и уплотнения осадков, магматические камеры и области вулканической активности).

Авторы выражают искреннюю благодарность доктору физ.-мат. наук В.О. Михайлову и доктору геол.-мин. наук М.Д. Хуторскому за ценные замечания, способствовавшие существенному улучшению работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артюшков Е.В., Чехович П.А.* Новейшие поднятия на древних кратонах: возможные механизмы и связь с сейсмичностью // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 4. С. 5–16.
- Артюшков Е.В.* Новейшие поднятия земной коры как следствие инфильтрации в литосферу мантийных флюидов // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 6. С. 738–760.
- Артюшков Е.В., Беляев И.В., Казанин Г.С. и др.* Механизмы образования сверхглубоких прогибов: Северо-Баренцевская впадина. Перспективы нефтегазности // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5–6. С. 821–846.
- Артюшков Е.В., Беляев И.В., Казанин Г.С. и др.* Образование сверхглубоких осадочных бассейнов вследствие метаморфизма с уплотнением пород в континентальной коре // Докл. РАН. 2013. 452. № 5. С. 539–542.
- Артюшков Е.В., Чехович П.А.* Мощность литосферы под докембрийскими кратонами и механизмы их новейших поднятий // Докл. РАН. 2016. Т. 466. № 2. С. 188–192.
- Артюшков Е.В., Чехович П.А.* Новейшие поднятия на раннедокембрийских кратонах вследствие метаморфизма с разуплотнением пород в земной коре // Докл. РАН. 2014. Т. 458. № 5. С. 567–571.
- Глико А.О.* Влияние процесса осаждения твердой фазы из гидротермального раствора на залечивание трещин и эволюцию проницаемости системы // Физика Земли. 2002. № 1. С. 53–59.
- Глико А.О.* Залечивание системы трещин вследствие выпадения осадка из охлаждающегося гидротермального раствора // Физика Земли. 2005. № 11. С. 95–100.
- Глико А.О., Ефимов А.Б.* Динамика фазовых границ в континентальной литосфере // Докл. СССР. 1979. Т. 245. С. 821–824.
- Глико А.О., Парфенюк О.И.* К 90-летию со дня рождения Елены Александровны Любимовой // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 3. С. 73–74.
- Глико А.О., Петрунин А.Г.* Квазистационарные модели теплопереноса в системах «черных курильщиков» // Докл. РАН. 1996. Т. 346. № 5. С. 812–814.
- Дергунов И.Д.* Методика геотермических измерений. Проблемы геотермии и практического использования тепла Земли. М.: АН СССР. 1959. Т. 1. С. 130–141.
- Дергунов И.Д., Горожанкин И.И.* К вопросу измерения температур верхних слоев земной коры // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1954. № 4. С. 312–319.
- Евсеев М.Н., Трубицын В.П.* Модель общемантийной конвекции с образованием долгоживущего изолированного резервуара, питающего срединно-океанический хребет // Докл. РАН. 2017а. Т. 476. № 2. С. 205–208.
- Евсеев М.Н., Трубицын В.П.* Пульсации и разрывы ножек тепловых мантийных плюмов // Докл. РАН. 2017. Т. 476. № 5. С. 559–561.
- Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Суетнова Е.И.* Математическая модель аккумуляции газовых гидратов, приуроченных к глубоководным грязевым вулканам // Докл. РАН. 474. № 1. 2017. С. 361–365.
- Карта новейшей тектоники Северной Евразии. 1:5 000 000 / Под ред. А.Ф. Грачева. М.: Министерство природных ресурсов России, РАН. 1997.
- Красковский С.А.* О некоторых очередных задачах геотермики // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1940. № 5. С. 691–698.
- Любимова Е.А.* Влияние радиоактивного распада на тепловой режим Земли // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1952. № 2. С. 3–14.
- Любимова Е.А.* Распределение энергии термоупругих напряжений внутри Земли и скорость ее накопления // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1963. № 3. С. 385–390.
- Любимова Е.А.* Роль температуропроводности в тепловом режиме Земли // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1953. № 6. С. 523–525.
- Любимова Е.А.* Термика Земли и Луны. М.: Наука. 1968. 279 с.
- Любимова Е.А., Александров А.Л., Дучков А.Д.* Методика изучения тепловых потоков через дно океанов. М.: Наука. 1973. 176 с.
- Любимова Е.А., Люсова Л.Н., Фирсов Ф.В.* Основы определения теплового потока из земных недр и результаты измерений // Геотермические исследования. М.: Наука. 1964. С. 5–104.

- Любимова Е.А., Никитина В.Н., Томара Г.А.* Тепловые поля внутренних и окраинных морей СССР (наблюдения и теория интерпретации). М.: Наука. 1976. 224 с.
- Любимова Е.А., Шелягин В.А., Шушпанов А.П.* Аппаратура для определения глубинного теплового потока. Проблемы глубинного теплового потока. М.: Наука. 1966. С. 107–132.
- Неотектоническая карта мира. Масштаб 1:15 000 000 / Под ред. Н.И. Николаева, Ю.Я. Кузнецова, А.А. Неймарка. М.: Мингео СССР. 1981.
- Парфенюк О.И.* Особенности теплового режима коллизионных надвиговых структур // *Физика Земли*. 2005. № 3. С. 68–70.
- Парфенюк О.И., Маршалль Ж.-К.* Численное моделирование термомеханической эволюции структурной зоны Капускейсинг (провинция Сьюперior Канадского щита) // *Физика Земли*. 1998. № 10. С. 22–32.
- Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б.* Связь глубинного теплового потока с тектоническим строением континентов // *Геотектоника*. 1968. № 4. С. 3–19.
- Суетнова Е.И.* Аккумуляция газовых гидратов в окрестности подводных грязевых вулканов // *Геофизические исследования*. 2016. Т. 17. № 4. С. 37–46.
- Суетнова Е.И.* Эволюция порового давления и аккумуляция поддонных газовых гидратов при последовательном накоплении осадков с различными реологическими и флюидодинамическими свойствами // *Геофизические исследования*. 2014. Т. 15. № 1. С. 7–14.
- Тихонов А.Н.* Математическая геофизика. Работы А.Н. Тихонова по математической геофизике. М.: ОИФЗ РАН. 1999. 476 с.
- Тихонов А.Н.* О влиянии радиоактивного распада на температуру земной коры // *Изв. АН СССР – ОМЭН. Сер. географ. и геофиз.* 1937. № 3. С. 431–459.
- Тихонов А.Н.* О термическом режиме глубокой скважины Сковородинской мерзлотной станции // *Изв. АН СССР – ОМЭН. Сер. географ. и геофиз.* 1939. № 1. С. 35–52.
- Трубицын В. П., Трубицын А.П.* Численная модель образования совокупности литосферных плит и их прохождения через границу 660 км // *Физика Земли*. 2014. № 6. С. 1–11.
- Трубицын В.П., Трубицын А.П.* Эффекты сжимаемости в уравнениях мантийной конвекции // *Физика Земли*. 2015. № 6. С. 3–15.
- Cermak V., Beck A., Hamza V.* International Heat Flow Commission: history and accomplishments over the last fifty-five years // *Intern. J. Terrestr. Heat Flow and Appl. Geothermics*. 2018. V. 1. № 1. P. 1–5. doi: <https://doi.org/10.31214/ijthfa.v1i1.17>
- Davis E.E., Chapman D.S.* Lithosphere, Oceanic: Thermal Structure. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, 2nd ed. Springer: Dordrecht. 2011.
- Davis E.E., Lister C.R.B.* Fundamentals of ridge crest topography // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1974. V. 21. P. 401–413.
- Gliko A.O., Mareschal J.-C.* Non-linear asymptotic solution to Stefan-like problems and the validity of the linear approximation // *Geophys. J. Intern.* 1989. V. 103. P. 1167–1179.
- Gliko A.O., Grachev A.F., Magnitsky V.A.* Thermal models for lithospheric thinning and associated uplift in the neotectonic phase of continental rifts development and intraplate volcanism // *J. Geodynamics*. 1985. V. 3. P. 137–154.
- Hamza V.M., Vieira F.P.* Global distribution of the lithosphere-asthenosphere boundary: a new look // *Solid Earth*. V. 3. 2012. P. 199–212.
- Husterok D.* Global Heat Flow Database. University of Adelaide. 2016. <http://heatflow.org/data>
- Jaupar C., Mareschal J.-C.* Lithosphere, Continental: Thermal Structure. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, 2nd ed. Springer: Dordrecht. 2011a.
- Jaupart C., Mareschal J.-C.* Heat Generation and Transport in the Earth. New York: Cambridge Univ. Press. 2011. 464 p.
- Langseth M.G., Le Pichon J.X., Ewing M.W.* Crustal structure of the mid-ocean ridges. 5. Heat flow through the Atlantic ocean and convection currents // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. P. 5321–5355.
- Lubimova E.A.* Thermal history of the Earth with consideration of the variable thermal conductivity of its mantle // *Geophys. J. Royal Astr. Soc.* 1958. V. 1. № 2. P. 38–48.
- Mareschal J.-C., Gliko A.O.* Lithosphere thinning, uplift and heat flow preceding rifting // *Tectonophysics*. 1991. V. 197. P. 117–126.
- McKenzie D.P.* Some remarks on the heat flow and gravity anomalies // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. P. 6261–6273.
- Mooney W.D.* Crust and Lithospheric Structure – Global Crustal Structure // *Treatise on Geophysics (Second Edition)*. Elsevier. 2015. V. 1. P. 339–390. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00010-5>
- Parker, R.L., Oldenburg D.W.* Thermal model of ocean ridges // *Nat. Phys. Sci.* 1973. V. 242. P. 137–139.
- Parphenuk O.I.* Thermal regime and heat transfer during the evolution of continental collision structures // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2016. V. 16. ES6006. doi: 10.2205/2016ES000589
- Parphenuk O.I.* Uplifts formation features in continental collision structures (evolution modeling) // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2015. V. 15. № 4. ES4002. doi: 10.2205/2015ES000556
- Parphenuk O.I., Dechoux V., Mareschal J.-C.* Finite – element models of evolution for the Kapuskasing structural zone // *Can. J. Earth Sci.* 1994. V. 31. № 7. P. 1227–1234.
- Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R.* Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set // *Rev. Geophysics*. 1993. V. 31. P. 267–280.
- Simakin A.G., Ghassemi A.* Mechanics of magma chamber with the implication of the effect of CO₂ fluxing // *Volcanoes / Ed. Gemma Aiello*. 2018. P. 1–36. ISBN978-953-51-5610-9.

Strutt R.J. On the distribution of radium in the earth's crust and on internal heat // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1906. V. 77. P. 472–485.

Thompson W. On the secular cooling of the Earth // Trans. Royal Soc. Edinburg. 1862. XXIII. P. 295–311.

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

Wendlandt R.F., Morgan P. Lithospheric thinning associated with rifting in East Africa // Nature. 1982. V. 298. P. 734–736.

Thermal Regime of the Earth's Lithosphere and the Mantle: Geothermal Studies at IPE RAS

A. O. Gliko^{a,*}, and O. L. Parphenuk^{a,}**

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242*

^{*}*E-mail: gliko@ifz.ru*

^{**}*E-mail: oparfenuk@ifz.ru*

Received June 18, 2018

The paper is devoted to a historical retrospective of the development of geothermal research in the former Soviet Union. The detailed history of the Laboratory of geothermics at the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS) from the mid-1950s to the mid-1980s when a full range of geothermal studies were conducted by the laboratory is presented. The main results with the special focus on the world-level achievements made by IPE RAS in this field are outlined. The second part of the paper addresses the key recent results including the theoretical studies of heat and mass transfer and numerical modeling of mantle convection.

Keywords: geothermics, heat flow density, thermal conductivity, radiogenic heat production, convection, lithosphere