

УДК 550.36.361

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ КОРЫ АНАБАРСКОГО ЩИТА

© 2017 С.Ю. Милановский<sup>1</sup>, М.К. Кабан<sup>1, 2</sup>, О.М. Розен<sup>3</sup>, А.В. Егоркин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242; e-mail: svetmil@mail.ru

<sup>2</sup>Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences Telegrafenberg Potsdam, 14473

<sup>3</sup>ФГБУ ГИН РАН, 119017

<sup>4</sup>Филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт геофизических методов разведки» ЦЕНТР «ГЕОН»

На примере Анабарского щита исследованы сейсмические, гравитационные, и тепловые характеристики гранулитовой области земной коры. Нижнекоровые комплексы Анабарского щита, выдвинутые к дневной поверхности могут быть разделены на пассивные (террейны) и активные (зоны коллизии) тектонические единицы. По профилю ГСЗ «Шпат» ( $V_p$  и  $V_s$  волны), была получена детальная структура Ю–В части Анабарского щита и прилегающих областей, для которых характерна вертикальная и латеральная неоднородности. Анализ гравитационного поля выявил линейные аномалии, соответствующие СЗ–ЮВ простирацию главных тектонических структур щита — гранулитовых террейнов и разделяющих их коллизионных зон и направление падения коровых блоков высокой плотности. Анабарский щит характеризуется крайне низкой плотностью измеренного теплового потока  $\sim(20-25)$  мВт/м<sup>2</sup>. Минимальна оценка глубинного потока на Анабаре  $\sim 30 \pm (5-7)$  мВт/м<sup>2</sup>. Средняя коровая теплогенерация была оценена в 0.36 мкВт/м<sup>3</sup>. Эта величина характерна для нижней континентальной коры. Мантийный тепловой поток составил 10–16 мВт/м<sup>2</sup>. Выявлена пространственная связь повышенной мощности мерзлоты (до 1500 м) с зоной Анабарского щита и его склонов, обусловленная аномально низким тепловым потоком, величина которого подвержена влиянию палеоклимата.

*Ключевые слова:* Анабарский щит, сейсмическая структура, гравитационное поле, тепловой поток.

### ВВЕДЕНИЕ

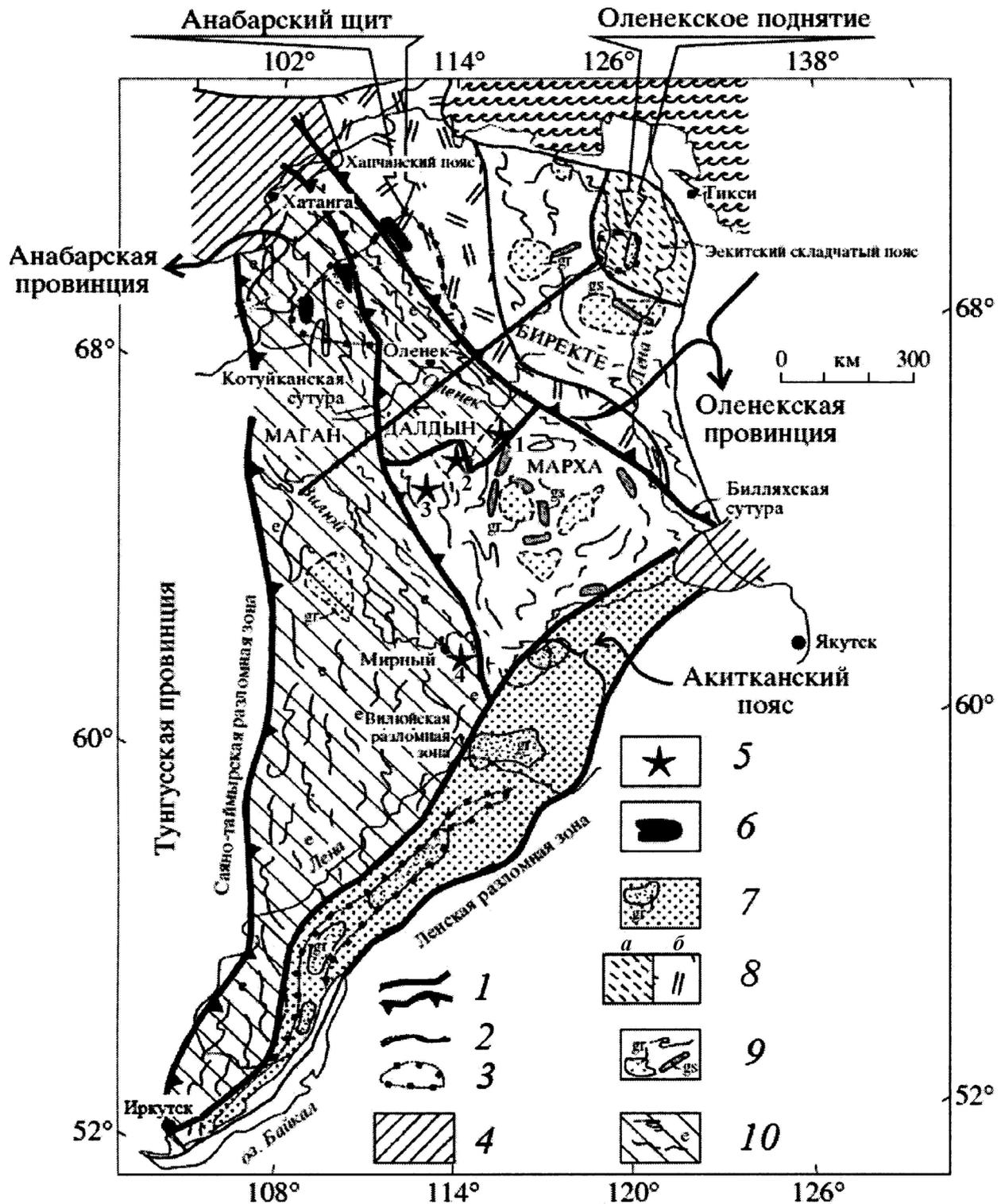
Выбор гранулитовых террейнов Анабара обусловлен возможностью изучения на дневной поверхности внутреннего строения глубоко эродированной коры и, одновременно, ее глубинного строения с помощью традиционных геофизических методов. Такой подход позволяет сочетать геологическую интерпретацию с геофизическими моделями. Кора Анабарского щита представляет реликт наиболее древнего сиалического покрова Земли, включая породы фундамента и осадочного чехла. В ее структуре отражены деформации, сформированные тангенциальным сжатием в интервале от 3 до 2 млрд лет назад. С геологической точки зрения нижнекоровые комплексы Анабарского щита, выдвинутые к земной поверхности тектоническими процессами, могут быть подразделены на пассивные (террейны) и активные

(коллизионные зоны) тектонические блоки. Одним из наиболее важных параметров является коровая радиогенная теплогенерация, которая наряду с наблюдаемым тепловым потоком контролирует геохимические особенности коры.

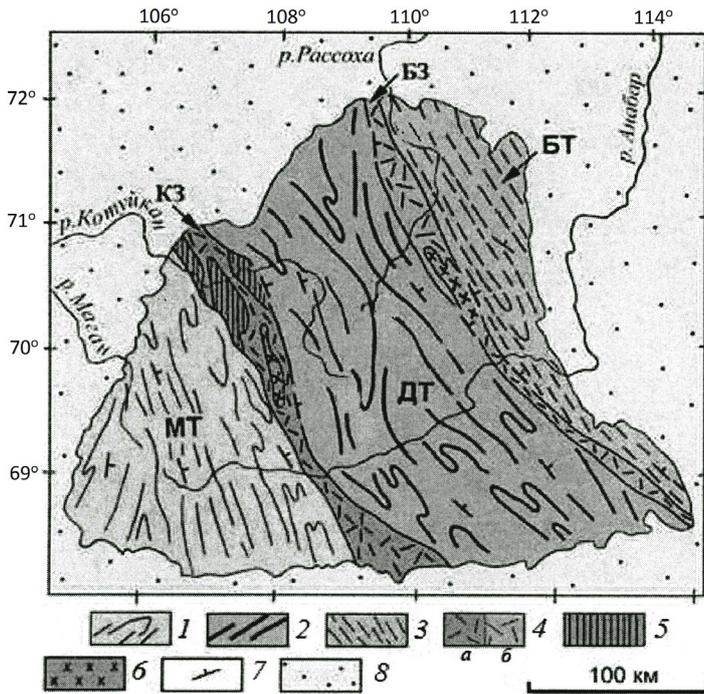
### ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Анабарский щит представляет собой эрозионное окно в фундаменте Сибирской платформы площадью порядка 60000 км<sup>2</sup> (рис. 1) Анабарский щит, наряду с другими гранулитовыми областями, интересует исследователей в контексте формирования первичной коры континентов, ее состава, а также состава современной нижней коры.

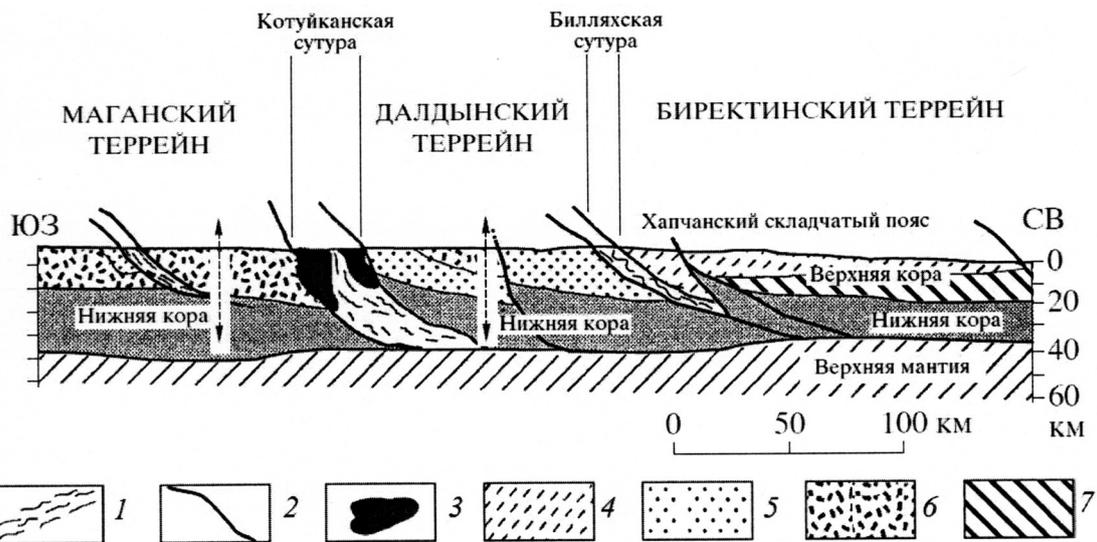
Щит состоит из трех гранулитовых террейнов: Маганского, Далдынского и Биректинского, разделенных двумя коллизионными зонами: Котуйоканской и Билляхской (рис. 1–3).



**Рис. 1.** Строение Анабарской коллизионной системы и ее обрамления (Розен и др., 2006): 1 — главные разломные зоны (коллизионные зоны, сутуры); 2 — прочие разломы; 3 — граница обнаженных регионов; 4 — платформенный чехол, мощность более 8 км; 5 — кимберлитовые поля с датированными коровыми ксенолитами: 1 — Муна; 2 — Далдын; 3 — Алакит; 4 — Мирный; 6 — габбро-анортозитовый комплекс, 2.55 млрд лет; 7 — известково-щелочные вулканиты, осадки, *гг* — А-граниты, 2.0–1.9 млрд лет; 8 — фельзические вулканиты, силициты, граниты — 1.85 млрд лет (*а*), парагнейсы и мета карбонаты, 2.4–2.0 млрд лет (*б*); 9 — гранит-зеленокаменный комплекс: *гс* — зеленокаменные пояса и мафические интрузии; *гг* — крупные плутоны гранитоидов, 2.9–2.5 млрд лет; 10 — комплекс плагиогнейсов, эндербитов и мафических гранулитов, 3.1–3.0 млрд лет. Террейны: Марха, Биректе — гранит-зеленокаменные, Маган, Далдын — гранулит-гнейсовые. Местоположение террейнов приведено на рис. 2. Отрезком линии показан изучаемый участок профиля «Шпат».



**Рис. 2.** Схема строения Анабарского щита (Розен, Федоровский, 2001): 1 — преимущественно верхнеанабарская серия в пределах Маганского террейна; 2 — преимущественно далдынская серия в пределах Далдынского террейна; 3 — хапчанская серия в пределах Биректинского террейна; 4 — бластомилониты и катаклазиты шовных зон: КЗ (а) и БЗ (б); 5 — Котуйканская группа массивов анортозитов; 6 — коллизионные гранитоиды; 7 — направления падения слоев и изоклинальных складок; 8 — платформенный чехол. Буквами обозначены: МТ — Маганский, ДТ — Далдынский и БТ — Биректинский террейны; КЗ — Котуйканская и БЗ — Билляхская коллизионные зоны (сутуры).



**Рис. 3.** Схематический профиль Анабарской коллизионной системы (Розен и др., 2006): 1 — главные разломные зоны (сутуры): тектонический меланж с апомилонитовым мигматитовым матриксом (1.9–1.8 млрд лет); 2 — поверхности надвигов; 3 — анортозиты и габбро (2.55 млрд лет); 4 — гранулитовые метаграувакки и метакarbonate (2.4–2.0 млрд лет); 5 — плагиогнейсы, эндербиты и мафические гранулиты (3.1–3.0 млрд лет); 6 — плагиогнейсы эндербиты и чарнокиты (3.0–2.9 млрд лет); 7 — гранит-зеленокаменная ассоциация (2.5 млрд лет). Положение нижней и верхней коры показано для визуальной оценки глубины эрозии коллизионной системы.

Зоны разломов представлены гигантским меланжем полигенных блоков и плит, консолидированных с породами ламуйского комплекса и расслоенных в результате интенсивных латеральных напряжений. Все тектонические структуры щита имеют общее СВ простирание и резкое СВ падение, предполагающее надвинутые вдоль зон коллизий в ЮЗ направлении террейны (Розен и др., 1990). На Анабарском щите, как и в других районах с древнейшими породами коры,

характерный магматический комплекс, представлен, главным образом, анортозитами. (Розен и др., 1988). В тектонической истории щита могут быть выделены две главные стадии (Розен, 1995):

1. Складчатая структура архейского Анабарского комплекса маркируется парагенезисом гранулитовой фации и характеризуется линейными, узкими, зачастую изоклинальными складками с однотипным СВ падением в пределах щита. Это результат тангенциального сжатия, близкого

во времени с эпохой гранулитового метаморфизма и значительного увеличения мощности складчатого комплекса, произошедшего около 3 млрд лет назад.

2. Другое крупнейшее тектоно-термальное событие 1.9–2.0 млрд лет — это формирование глубинных разломов, которые по характерным чертам их сопровождающих, могут быть классифицированы как зоны глубоких подвижек и диафтореза.

В конце раннепротерозойского времени (1.9 млрд лет назад), движения архейских террейнов происходило в процессе остывания в условиях типичных для зеленосланцевой формации. В результате зоны тектонических деформаций приняли форму крутых надвигов с блоками, движущимися в ЮЗ направлении. Отмечается сохранение общего типа архейских тектонических деформаций и в протерозое при повторных сжимающих напряжениях гранулитового комплекса, сформировавшегося ранее. В ходе дислокаций по этим разломным зонам, огромные коровые блоки, представленные сегодня гранулитами и анортозитами, выдвигались с глубоких горизонтов коры. Таким образом, во время второго тектоно-термального события первичная кора подверглась глубоким структурным и вещественным трансформациям на площади порядка (10–30)×200 км.

### СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КОРЫ АНАБАРСКОГО ЩИТА

По проекту глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) «ШПАТ» в 1981 г. НПО «Нефтегеофизика» отработан профиль «Барнаул-Североенисейск-Тикси» (Атлас ..., 2013) (рис. 1).

Для улучшения фазовой корреляции отражений, разрешения и отношения сигнал-помеха для данных ГСЗ нами использовалось комбинация среднеквадратичной скорости и частотной фильтрации. Применение среднеквадратичного фильтра к скоростным экспериментальным данным показало, что эта процедура облегчает идентификацию фаз (Егоркин, 1999; Egorkin, 1998). Для всех взрывов выделялись не только основные коровые фазы волн, такие как P<sub>g</sub>, S<sub>g</sub> (продольные и поперечные преломленные в верхней части коры), PiP, SiS (закритически отраженные продольные и поперечные волны) и PmP, SmS (продольная и поперечные отражения от границы Мохоровичича (Мохо)), но и прослеживались и волны от погружающихся отражателей. Скоростные разрезы строились для продольных, поперечных и обменных волн<sup>1</sup>. Интерпретация проводилась в основном с использованием двумерного лучевого моделирования прямой задачи. Отраженные и обменные волны обеспечивали детальную картину всей коры. Преломленные волны отображали только верхние (~10 км) части коры и верхней мантии. Наиболее важной особенностью на разрезе — наличие плавно, с углом к горизонту порядка 17°, погружающихся на северо-восток, отражающих горизонтов (рис. 4). Динамические особенности этих горизонтов, а также незначительный контраст импеданса вдоль погружающихся отражающих горизонтов позволяет предположить, что это относительно тонкие (1.0–2.0 км) слои со сложно построенной надвиговой структурой являющиеся разломами срыва. Анализ геологической ситуации (рис. 1)

<sup>1</sup> В настоящей статье приводится версия сейсмического разреза (рис. 4) и интерпретация участка профиля «Шпат», полученная А.В. Егоркиным.

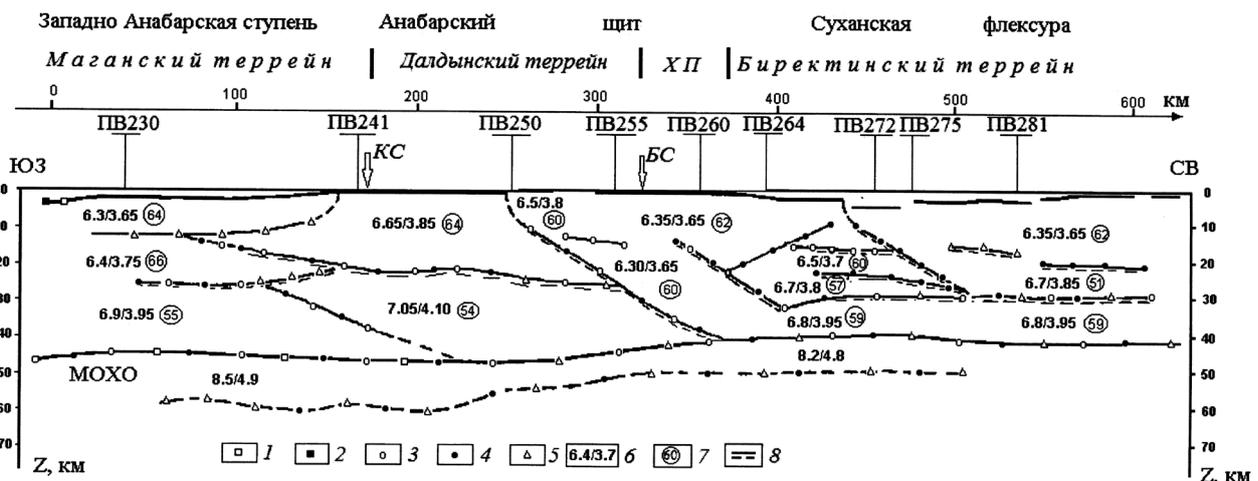


Рис. 4. Скоростной разрез по профилю ГСЗ «Шпат» по данным лучевого моделирования для рефрагированных волн: 1 — P-волн, 2 — S-волн; для отраженных волн: 3 — P-волн, 4 — S-волн и обменных волн, 5 — P-S, 6 — скорости P-волн и S-волн в км/с; 7 — содержание кремнекислоты (SiO<sub>2</sub>), определенное по значениям V<sub>p</sub> и V<sub>s</sub> с использованием эмпирического соотношения, предложенного в работах (Алейников и др., 1986; Егоркин, 1991; Egorkin, 1998); 8 — сейсмические границы. ПВ255 — пункты взрыва. ХП — Хапчаганская складчатая зона. Вертикальными стрелками обозначены: КС — Котуйканская сутура, БС — Билляхская сутура.

и сейсмического разреза (рис. 4) позволяет соотнести в пределах рассматриваемого региона основные тектонические структуры с результатами ГСЗ. На разрезе выделены четыре блока разделенные зонами разломов (сутур): Западно Анабарская ступень (Маганский террейн), отделена Котуйканской сутурой от следующего блока — центральной части Анабарского щита (террейн Далдын), далее Билляхская сутура и промежуточный блок — Хапчаганский складчатый пояс и Суханская флексура (террейн Биректе).

Маганский и Биректинский террейны имеют структуру типичную для щитов и платформ (Егоркин, 1999, Christensen, Mooney, 1995): верхняя кристаллическая кора (мощность от 12–17 км,  $V_p$  — (6.30–6.35) км/с,  $V_s$  — 3.65 км/с), средняя кора (мощность 10–12 км,  $V_p$  — 6.4–6.7 км/с,  $V_s$  — 3.7–3.8 км/с) и нижняя кора (мощность 13–17 км,  $V_p$  — (6.8–6.9) км/с,  $V_s$  — 3.95 км/с). На Анабаре (Далдынский террейн) и в Хапчаганском поясе имеется только два слоя (рис. 4). Эти слои имеют мощности 15–20 км (верхний слой), 20–30 км (нижний слой).  $V_p$  в первом слое 6.50–6.65 км/с,  $V_s$  — 3.65–3.85 км/с и во втором слое  $V_p$  составляет 6.80–7.05 км/с,  $V_s$  — 3.85–4.10 км/с, иными словами они соответствуют средней и нижней коре. Граничная скорость на Мохо под щитом существенно выше, чем на примыкающих к нему структурах и составляет 8.5 км/с. Мощность коры достигает 46 км в центральной части щита. По поперечным и обменным волнам на глубине 50–60 км прослеживается связанная с этим волнами граница.

### ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АНАБАРСКОГО ЩИТА

Проведенный нами анализ гравитационного поля Анабарского щита и прилегающих областей выявил линейные аномалии, соответствующие простираению главных тектонических структур щита — гранулитовых террейнов и разделяющих их коллизионных зон (рис. 5). Линейным зонам гранулитового метаморфизма соответствуют максимумы силы тяжести. Линейный характер поля здесь имеют и магнитные аномалии (Розен и др., 1986). Анализ мантийных, изостатических, декомпенсационных гравитационных аномалий и аномалий в редукции Буге, проведенный с целью оценки плотностных характеристик блоков коры и верхней мантии, подтверждает падение слоев по геологическим данным и геометрию коровых границ, полученных по профилю ГСЗ «Шпат» (рис. 4). В частности, СВ смещение центра максимума положительной линейной аномалии декомпенсационного поля (рис. 5а) по отношению к центру аналогичной аномалии изостатического поля (рис. 5б), указывает на падение

гранулитового тела повышенной плотности в СВ направлении.

Анализ гравитационных данных проходил в два этапа. На первом из них мы проанализировали различные гравитационные карты для составления представления о главных аномалообразующих телах Сибирской платформы, а на втором провели 2D-моделирование с высоким разрешением на основе сейсмического профиля ГСЗ «Шпат».

**Плотностная модель литосферы и ее отражение в различных трансформациях гравитационного поля.** Исходной информацией для моделирования являлось осредненное по сетке  $10' \times 15'$  минут (порядка  $9 \times 19$  км) аномалии Буге с поправкой за влияние рельефа в радиусе 200 км (рис. 5а). Количество измерений осредненных в каждой элементарной трапеции составляло  $\geq 35$  для исследуемого региона.

После удаления влияния аномальных масс осадочного чехла и масс, возникающих в связи с вариациями мощности коры (Кабан, 2000) из гравитационного поля аномалий Буге, были получены «остаточные» аномалии гравитационного поля (рис. 5б). Эта карта основана на результатах (Artemjev et al., 1994), полученных для большей части Северной Евразии, где на основе доступной геофизической информации была построена априорная плотностная модель земной коры. Эти аномалии несут в себе информацию о ранее не известных плотностных неоднородностях, находящихся главным образом в верхней мантии, при этом их достоверность зависит от достоверности данных о коре использованных в расчетах. Поскольку для изучаемого региона плотность сейсмических исследований ГСЗ мала, карта остаточных аномалий может рассматриваться как предварительная региональная оценка, а результаты ее интерпретации как предварительные.

Нельзя говорить о значительных мантийных аномалиях под Анабарским щитом (рис. 5б), что подтверждает изопикническую гипотезу равных плотностей Томаса Джордана (Jordan, 1981), согласно которой увеличение плотности в мантии за счет аномально низкой современной температуры под кратонами, в первом приближении, компенсируется изменением состава при деплетированием верхней мантии на стадии ранней геологической истории Земли, сопровождаемого понижением плотности.

Геотермическое моделирование, представленное в последующей части статьи, показало, что как верхнемантийные температура, так и плотность мантийного теплового потока под Анабаром ниже значений характерных для платформенных условий. Относительно малоамплитудные особенности остаточного

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

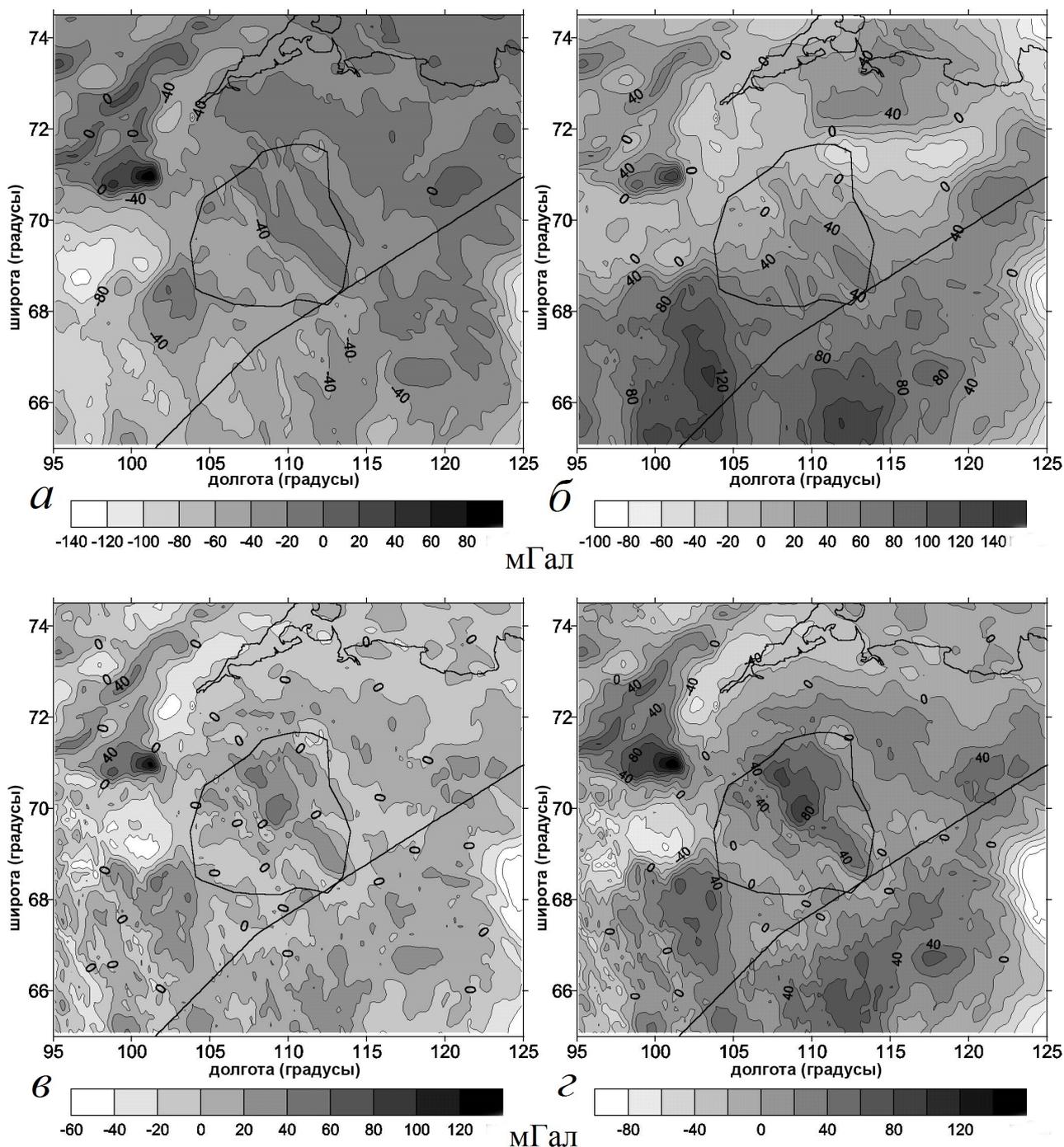


Рис. 5. Схема аномалий Буге (а); мантийные (остаточные) гравитационные аномалии, полученные вычитанием из аномалии Буге гравитационного эффекта осадочного чехла и коровых масс (б); изостатические аномалии (в); декомпенсационные гравитационные аномалии (г). Контуры щита, береговая линия и линия профиля обозначены сплошными линиями.

мантийного гравитационного поля (рис. 5б) не проявляют заметной связи со структурами Анабарского щита.

Изостатические аномалии (рис. 5в) получены после удаления гравитационного эффекта изостатически скомпенсированной модели литосферы из остаточного аномального поля. Эта модель была получена путем добавления в первичную коровую модель дополнительных масс, компенсирующих в сумме плотностные

неоднородности, обусловленные топографией, осадочными толщами и вариациями глубины Мохо. Таким образом, общая сумма всех плотностных неоднородностей до глубины 100 км (глубина компенсации) эквивалентна нулю.

Компенсируемые массы расположены, главным образом, в верхней мантии, что подтверждено адмитансным анализом (Artemjev et al., 1994). Следовательно, остаточные изостатические аномалии отражают влияние отклонения литос-

феры от изостатического равновесия и все еще неизвестные (либо не принимаемые в расчет) плотностные неоднородности в коре. Отличие от подхода в работе (Artemjev et al., 1994) в том, что мы проводим более детальный анализ данных по Анабару, а разрешение для расчетного поля у нас на порядок выше.

Район исследования тектонически стабилен, и нет указаний на существенно напряженное состояние литосферы, что обычно сопровождается нарушением изостазии, что дает основание для использования изостатических аномалий для изучения его структуры. Характер изостатических аномалий в районе Анабарского щита заметно отличается от прилегающих областей (рис. 5б). Для него характерно явно выраженный линейный максимум. Эти линейные элементы соответствуют в целом геологическим структурам, экспонированным над дневную поверхность (рис. 1–3). Наиболее выраженный максимум с амплитудой порядка 50 мГал расположен в центральной части щита и соответствует метабазит-плагиогнейсовой формации Далдынского террейна.

Изостатические аномалии (рассматриваемые как индикаторы коровых структур) могут быть существенно меньшей амплитуды, чем фактическое поле «неизвестных» коровых неоднородностей если последние изостатически скомпенсированы, поскольку суммарное поле является суммой распределенных масс (Зорин и др., 1985). Это может не только уменьшать амплитуду аномалий, но и менять их конфигурацию, поскольку соотношение полей зависит и от длины волны. Была предложена специальная методика для выделения из изостатических аномалий компоненты обусловленной неизвестными массами в верхней части коры (Зорин и др., 1985; Cordell et al., 1991). Такая компонента отнесена к «декомпенсационным» аномалиям гравитационного поля. Декомпенсационные аномалии для Анабарского щита рассчитаны на основе изостатических аномалий (рис. 5а). При моделировании, мы допускаем, что глубина уровня компенсации равна 45 км (это средняя глубина до Мохо в данном регионе) (Кабан, 2000) и то, что удаляемая из первичного гравитационного поля составляющая имеет длины волн более 1000 км, что обеспечивает устойчивость решения.

Мы предполагаем, что декомпенсационные аномалии отражают неоднородности для всей коры, в то время как изостатические аномалии обусловлены главным образом верхнекоровыми плотностными неоднородностями. Наиболее заметное различие между декомпенсационными и изостатическими аномалиями отмечается в центральной части Анабарского щита, где амплитуда первых, по крайней мере, вдвое больше амплитуды вторых и превышает

80 мГал. Такой заметный максимум может быть объяснен, только если допустить, что плотность большей части коры щита превышает плотность нормальной коры. Изометрические области, имеющие нулевые и отрицательные значения поля в декомпенсационных аномалиях: на юго-западе (крупная), северо-востоке (малая) и на востоке (крупная) пространственно совпадают с Котуйканской (возраст  $1900 \pm 50$  млн лет), Попигайской (возраст 36 млн лет) и Куонамской (возраст  $1900 \pm 50$  млн лет) кольцевыми структурами. Наиболее ярко в аномалиях Буге, декомпенсационных и изостатических аномалиях проявлена Котуйканская кольцевая структура.

**Двумерная комплексная сейсмо-плотностная модель.** Анализ гравитационных карт позволяет определить лишь географическое положение коровых плотностных аномалий. Для моделирования детальной плотностной структуры литосферы необходима дополнительная информация, которая доступна из сейсмического профиля «Шпат» (рис. 4). Этот профиль только «затрагивает» область с обнаженной консолидированной корой, но район Анабарского щита как тектоническая единица существенно шире его обнаженной части (рис. 2) и профиль сечет линейные гравитационные аномалии характерные для щита, что дает основание для 2D-моделирования.

Для уменьшения влияния мелкомасштабных особенностей гравитационное поле было осреднено в радиусе  $\pm 50$  км для каждой точки профиля. Результат этого осреднения (рис. 6) несколько отличается от значений поля вдоль профиля (рис. 5а). При моделировании использовалась двумерная программа моделирования гравитационного поля «Talwani» (Г. Гольца (G. Goltz) и С. Шмидта (S. Schmidt), персональное сообщение). При моделировании мы стремились максимально следовать исходной сейсмической модели, а для исходного распределения плотности использовали соотношение «плотность–скорость», предложенное в работе (Christensen, Mooney, 1995). Выбор данного соотношения не критичен ввиду последующей адаптации модели.

В дальнейшем эти плотности были модифицированы в соответствии с наблюдаемым гравитационным полем (рис. 6). Основная и наиболее интересная особенность полученного разреза скорость–плотность это наклонный коровый блок в центральной части профиля. По своим плотностным параметрам этот блок может относиться к третьему слою консолидированной коры (нижней коре). Он так же характеризуется относительно низким содержанием кремнекислоты (60%) в верхней части коры полученного с использованием эмпирического соотношения, предложенного в работах (Алей-



ников и др., 1986; Егоркин, 1991; Egorkin, 1998), хотя для других частей профиля заметной корреляции между этим параметром и плотностью не отмечено.

### ГЕОТЕРМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАБАРСКОГО ЩИТА

**Данные о тепловом потоке.** Измерения теплового потока на щите крайне редки и неравномерны по площади. Средний тепловой поток Восточно-Сибирской платформы характеризуется умеренными величинами (35–45) мВт/м<sup>2</sup>, но в пределах платформы достаточно дифференцирован (Тепловое ..., 1987). Важно иметь в виду (для анализа термограмм в связи с климатическими воздействиями), что активное изучение теплового потока Сибири продолжалось до конца 1980-х гг. (Дучков, Соколова, 2014). В последующие годы резко сократился объем бурения скважин, они стали менее доступными.

Плотность теплового потока на Анабаре оценивается между 20 мВт/м<sup>2</sup> и 30 мВт/м<sup>2</sup> (Дучков и др., 1982). Это область устойчивой вечной мерзлоты. Ее мощность составляет 700–1000 м (Балобаев, 1991).

По данным (Геотермический ..., 2016) составлена таблица данных о тепловых потоках в зоне Анабарского свода и на его окраинах. По ряду скважин, таблицу дополняют данные об интервалах измерений температуры и абсолютных отметках устья скважин из мирового каталога теплового потока (Pollack et al., 1991).

Минимальный тепловой поток в районе трубок Удачная, Айхал и Юбилейная 11–25 мВт/м<sup>2</sup> (Девяткин, 1993) и мощность криолитозоны там составила более 1400 м (таблица). Из всех скважин только № 5 пробурена в свободной от платформенного чехла области щита. Скважина № 6 на западной границе щита и Котуйской впадины в районе флюоритового месторождения Браас. Наиболее убедительными представляются оценки теплового потока в глубоких скважинах, достигнувших подошвы криолитозоны — №№ 1, 3, 8, 13. В этих случаях можно увереннее говорить о термически стационарной мерзлоте в интервале ниже приповерхностной зоны подверженной влиянию природных и антропогенных климатических изменений. Так, например, термограммы по скважинам №№ 5, 6, 9 приведенные в работе (Теплофизические ..., 1983) не достигли нулевой температуры, что недостаточно для полноценной интерпретации. Отмечается повышение теплового потока в направлении Котуйской впадины на западном склоне Анабара (скв. №№ 6, 7, 9). Искажения за счет рельефа не представляется возможным оценить точно, поскольку нет данных о его превы-

шениях в точке заложения скважин. Тем не менее вероятность занижения потока в случае вершинного положения устья скважины наиболее велика (Балобаев, 1987). Обобщая исследования в районе трубки Юбилейной (таблица, скв. № 3), В.Н. Девяткин (1997) отмечал рост потока от 20 мВт/м<sup>2</sup> в верхней части разреза до 29 мВт/м<sup>2</sup> в интервале глубинах 800–1000 м, (подошва мерзлоты на 800 м) при среднем потоке 25 мВт/м<sup>2</sup>. Для района трубки Айхал им установлен разброс потоков в мерзлой и талой зоне от 15 до 30 мВт/м<sup>2</sup>. За пределами складчатых структур щита измеренный тепловой поток возрастает до 40–45 мВт/м<sup>2</sup> (таблица).

Опыт изучения теплового потока на Балтийском щите в Кольской сверхглубокой скважине (Любимова и др. 1985) а также в ряде других сверхглубоких скважинах свидетельствует о росте измеренного потока с глубиной. Наблюдения в районе трубки Юбилейной демонстрируют схожий эффект.

Важным фактором, искажающим глубинный поток в сторону его занижения, является климатический в сочетании с формированием слоистой системы (в верхней части трещиноватой коры) минерализованных вод (криопэггов) в результате морских трансгрессий до северной границы щита (Алексеев, 2007). Влияние палеоклимата (за последние 500 лет включая его потепление в XX в.) на тепловой режим верхних частей разреза России, в том числе для территории Восточной Сибири, исследовано на ограниченном числе скважин относительно небольшой глубины в работе (Pollack et al., 2003). Результаты климатической инверсии сопоставлялись с прокси данными. Более сложная картина формирования палеоклиматического сигнала в плейстоцене — голоцене в центральной Якутии на ЮВ от Анабара анализируется в работе (Demezhko et al., 2007) в связи с возможностью формированием ледовых заторов для талых вод, поступающих с южных широт.

Исследование морен, сформированных Зырянским оледенением (Андреева, 1978) в пределах обширной территории севера Сибири, в том числе на восточном и западном склонах Анабара, представляется важным для понимания масштабов и географии ледниковых воздействий. Попытка комплексного подхода к анализу роли палеоклимата северного полушария была предпринята на примере уникальных геотермических данных полученных в скважинах, пробуренных в осадках ударного кратерного озера Эльгыгытгын (Чукотка) и на его берегу (Mottaghy et al., 2013). Наложение модельной температурной истории поверхности, включая последний (Зырянский) ледниковый минимум (в статье был принят интервал 45000–12000 лет

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Тепловые потоки, температура в коре до глубины 5 км в пределах Анабарского щита и его обрамления.

№ п/п	Участок, № скв. / № уч-ка/ абс.; отметка устья скважин, м	Широта град. с.ш.	Долгота, град. в.д.	Тепловой поток, мВт/м <sup>2</sup> (интервал измерений T), м	T <sub>0,5км</sub> , °С	T <sub>1км</sub> , °С	T <sub>2км</sub> , °С	T <sub>3км</sub> , °С	T <sub>5км</sub> , °С	Нижняя граница мерзлоты, м	Тектоническая зона
1	Мархинский, -/387/260	66.25	114.67	21.0 (20 – 2000)	-4.0	-2.8	4.0	13.0	30.0	1500.0	Далдын
2	Сытыкан, -/384/ /730	66.17	111.67	15.0 (20 – 600)	-2.9	0.0	5.0	10.0	26.0	1000.0	Далдын/ Марха
3	Юбилейный, -/382/620	66.0	111.25	17.0 (20 – 1000)	-	-	12.0	19.0	38.0	800	Далдын/ Марха
4	Удачный, -/385-386/350	66.6	112.28	20.0 (20 – 700)	-1.9	1.5	10.0	19.0	35.0	800.0	Далдын
5	Анабарский (Скальный), 1086/ 374/70	71.583	110.7	18.0 (20 – 720)	-5.0	-1.0	6.0	14.0	40.0	1200.0	Биректе
6	Браас, 7/378/600	69.83	106	20.0 (20 – 195)	-3.0	1.0	10.0	19.0	40.0	900.0	Маган
7	Маймеча, 5/-/-	70.07	101.1	28.0	-3.0	11.0	21.0	31.0	54.0	800.0	Маган Котуйская впадина
8	Айхал, -/383/520	66	111.5	22.0 (20 – 800)	-2.1	4.0	12.0	20.0	38.0	700.0	Далдын Марха
9	Ханарский, СП5/386/ 256	70.167	98.25	44.0 (20 – 400)	-0.8	10.0	32.0	55.0	100.0	560	Маган, Котуйская впадина
10	Сюльдюкар, -/397/178	63.85	113.25	25.0 (20 – 2200)	0.0	2.0	8.0	16.0	26.0	500	Маган
11	Чай-Тумус	72.42	125.58	45.0	0.08	9.0	28.0	47.0	85.0	540.0	
12	Владимировский, 22/-/-	73.82	102.38	48.0	-3.0	8.0	40.0	71.0	135.0	750.0	
13	Балахинский, 1/372/70	72.75	99.25	42.0 (70 – 600)	-1.4	12.0	35.0	69.0	117.0	580	
14	Хорудулахский, 1/-/-	72.95	108.15	40.0	-	5.0	21.0	35.0	75.0	700	Билляхская сутура

назад,  $\delta T = -14^\circ \text{K}$ ) и малый ледниковый период (100–500 лет назад,  $\delta T = -2.5^\circ \text{K}$ ) и потепление  $\delta T = +1^\circ \text{K}$  для последних 50 лет, показали заметное отличие нестационарной термограммы от стационарной, в сторону уменьшения градиента до 60%, которое на модели прослеживается до глубины порядка 500 м. Проведенные расчеты (Mottaghy et al., 2013) показали заметное влияние зоны смены фазового состояния (мерзлые — талые) на форму термограммы при пересечении этой зоны. В.Н. Девяткин (1997) относит область Анабарского поднятия к квазистационарному геотемпературному режиму вечномерзлых пород, что подразумевает равенство тепловых потоков в нижней части криолитозоны и подстилающей

ее талой зоны, хотя по ряду скважин отмечен рост потока с глубиной. В его работе приведено обобщение по тепловым потокам Севера Евразии, измеренным над криолитозоной ( $q_{\text{нм}}$ ), в криолитозоне ( $q_{\text{м}}$ ), под криолитозоной ( $q$ ) и отношение  $n = q_{\text{м}}/q$ . Для Сибирской платформы графики этих величин даны для меридиана  $124^\circ$  в.д., расположенного восточнее Анабара и секущему Якутскую кимберлитовую провинцию в пределах террейнов Биректе и Марха. Показательно, что вплоть до  $60^\circ$  с.ш. отношение  $n < 1$ , а на широтах Анабарского щита  $n < 0.6$ , что формально соответствует деградации мерзлой толще на нижней границе, если речь идет о потоках, замеренных над и под фазовой границей. Однако

этот вывод должен необходимо рассматриваться с учетом интервала глубин измерений температуры, поскольку термограмма интегрирует все тепловые события — мантийный поток, фазовые переходы на подошве мерзлоты, теплогенерацию в коре, региональные и глобальные палеоклиматические возмущения, движения флюида, рельеф, тепловые свойства среды и т.д. (Демежко, 2001). Иными словами, остается открытым вопрос о вкладе ледниковых эпох и межледниковых периодов в искажение измеренного теплового потока в верхней части разреза, с учетом тепловой инерции мерзлых толщ.

Согласно работе (Алексеев, 2007), в определенные периоды, при морской трансгрессии, связанной со снятием ледовой нагрузки в не полностью компенсированный гляциоизостатический прогиб в трещиноватую кору Анабара проникали соленые воды каргинского моря. Важно, что эти воды являлись носителями температурных сигналов с поверхности, оставаясь в жидком состоянии вплоть до формирования отрицательно температурных криопэгов. Можно согласиться с мнением А.Д. Дучкова и Л.С. Соколовой (2014) о «поверхностной» природе аномально низких потоков на Анабаре.

Очевидно, что аномально низкие значения теплового потока требуют уточнения путем измерения температуры в более глубоких скважинах как в мерзлой, так и подмерзлотной зонах.

Подводя итог краткому обзору величин тепловых потоков на Анабаре, мы предполагаем, что его средняя величина ниже криолитозоны, важная для расчета температур в литосферном киле Анабара, может составлять не менее 30 мВт/м<sup>2</sup>.

**Радиогенная теплогенерация в обнаженных породах фундамента.** Породы кристаллической коры, обнаженные на поверхности Анабарского щита, позволяют детально оценить их радиогенную теплогенерацию на уровне современного эрозионного среза. Оценка содержания U, Th и K (РАЭ) в 839 образцах, в основном выполненная гамма-спектрометрическим методом была дана в работе (Розен и др., 1988, 1989) совместно с данными более 6000 определений плотности (Пискарев, 1976; Самков, Потапьев, 1986). Эти измерения позволяют провести расчет теплогенерации по формуле из работы (Rybach, Buntebarth, 1982):

$$A = 0.132\rho^* (0.718C_U + 0.193C_{Th} + 0.262C_K), \quad (1)$$

где A — теплогенерация (мкВт/м<sup>3</sup>), C<sub>U</sub> и C<sub>Th</sub> — U и Th содержание в (ppm), соответственно, C<sub>K</sub> — содержание K в (%) и плотность (г/см<sup>3</sup>).

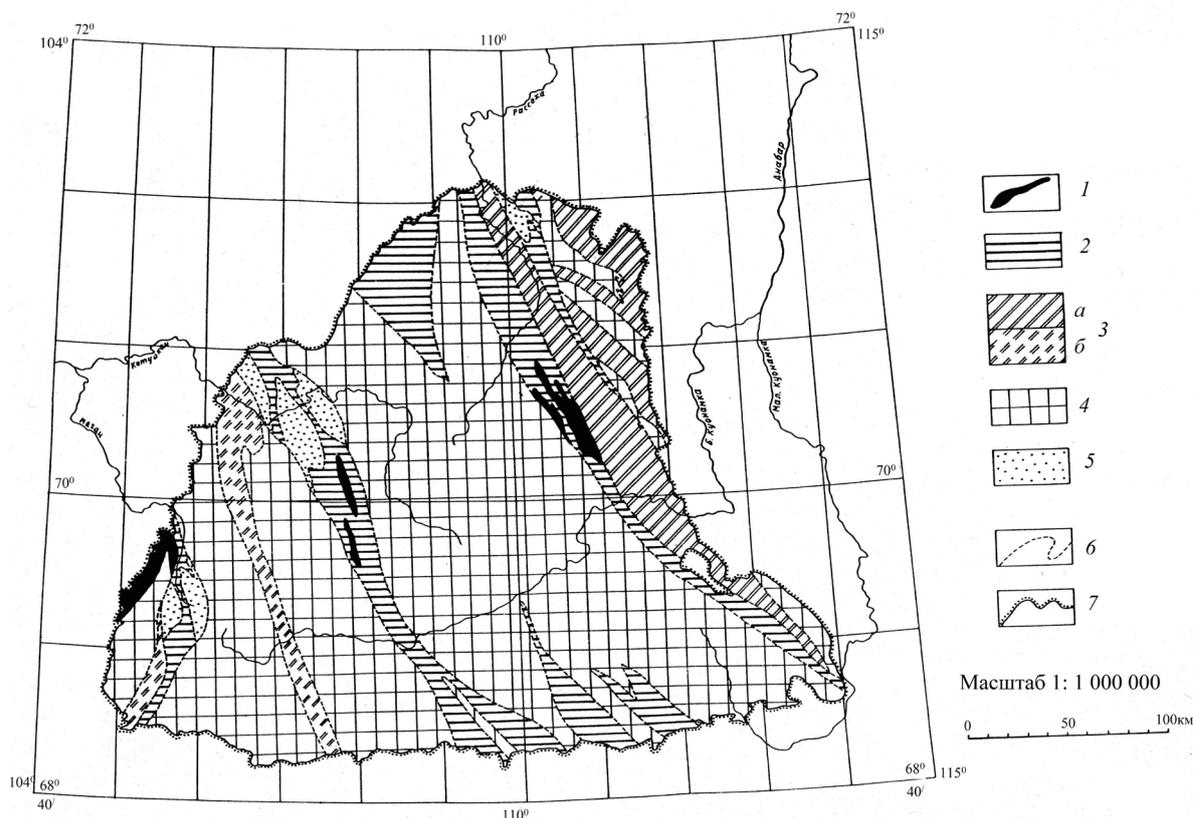
Для определения объемных соотношений пород в пределах геологических объектов (формаций) использованы послойные описания разрезов (Розен, Милановский, 1988, Розен и др.,

1989). На основе средних содержаний радиоактивных элементов в 30 типах (Розен, 1992) изученных пород были определены средневзвешенные значения теплогенерации. Эти исследования легли в основу карты приведенной на рис. 7. Средняя поверхностная теплогенерация на Анабарском щите составила 0.76 мкВт/м<sup>3</sup> ( $\rho = 2.76$  г/см<sup>3</sup>), что заметно меньше средних значений типичных для верхних слоев архейской коры (Хуторской, Поляк, 2016).

**Модель коровой теплогенерации Анабарского щита.** Ранее модель коровой теплогенерации щита основанная на петрологических данных, была предложена в работах (Розен, 1992; Розен, Милановский, 1988). Результат полученный для коры щита на сейсмическом разрезе по профилю «Шпат» проходящем через его южный склон (рис. 4) дает основание для увязки с данными петрологии. На разрезе (рис. 4) отмечается субгоризонтальная граница, погружающаяся с 10 до 20 км. Ее можно интерпретировать как плоскость надвигов, проявляющейся ближе к поверхности в форме крутопадающих листрических взбросов, причем зоны распространения тектонит-гранит-мигматитовой формации, по-видимому, погружаются до глубин 20 км, где выполаживаются, а мощность их резко сокращается и оказывается пренебрежимо малой при проведении расчетов теплогенерации коры.

Проведенный нами анализ гравитационного поля, показал, что наиболее интенсивная положительная аномалия Буге характеризует поля развития метабазит-плагиогнейсов (Далдынский террейн), выдвинутых на поверхность в тектонических окнах и наиболее глубоко эродированных. Эти соображения позволяют экстраполировать среднюю величину теплогенерации для поверхности щита (0.76 мкВт/м<sup>3</sup>) до глубин первой поверхности раздела (10 км), а величину, характеризующую метабазит-плагиогнейсовую ассоциацию (0.41 мкВт/м<sup>3</sup>) — далее до глубин 20 км.

Особое место в разрезе континентальной коры занимает нижний горизонт, непосредственно прилегающий к верхней мантии. Его мощность его обычно определяется в 10 км (Meisner, 1986). Теплогенерация пород этого, уровня коры на Анабарском щите может быть оценена по коровым ксенолитам в кимберлитовых трубках, которые представлены большей частью гранулитами основного состава (Герасимчук, Серенко, 1988). Теплогенерация одного образца из таких гранулитов составила 0.076 мкВт/м<sup>3</sup> (Shatsky et al., 1990). Для данного слоя коры щита можно принять среднюю оценку теплогенерации гранулитовых ксенолитов в щелочных базальтах и кимберлитах различных регионов, составляющую 0.08 мкВт/м<sup>3</sup> (Rudnick, Presper,



**Рис. 7.** Карта распределения теплогенерации ( $\text{мкВт}/\text{м}^3$ ) на уровне современного эрозионного среза Анабарского щита: 1 — 2.12–3.88 (граниты); 2 — 1.22 (тектонит-гранитоиды); 3 — 1.09 (карбонат-плаггиогнейсы, средневзвешенная величина), из них: 1.18 — для восточно-хапчаганской серии (а), 0.85 — для западно-хапчаганской серии (б); 4 — 0.41–0.56 (метабазит-плаггиогнейсы); 5 — 0.16 (анортозиты); 6 — границы областей с различной теплогенерацией и 7 — границы осадочного чехла.

1990) Для интервала 20–30 км, ввиду отсутствия экспериментальных данных теплогенерацию оценят путем интерполяции.

Полученные величины характеризуют послойную модель распределения интенсивностей теплогенерации в земной коре щита. Эта модель удовлетворяет универсальному эмпирическому уравнению для континентальной коры, связывающему теплогенерацию  $A_0$  на поверхности и на глубине  $A_z$  через характеристическую глубину  $D$  (Lachenbruch, 1970):

$$A_z = A_0 * e^{-z/D}, \quad (2)$$

где  $A_0 = 0.804 \text{ мкВт}/\text{м}^3$  и  $D = 13.2 \text{ км}$  (коэффициент корреляции  $r = 0.997$  при уровне значимости 97.5%).

Для древних щитов характеристическая глубина  $D$ , где предположительно сосредоточена главная масса РАЭ и теплогенерация составляет 63% от общекоровой, варьирует в пределах 8–15 км (Condie, 1989). Уравнение (2) позволяет считать правомерным сделанные ранее допущения при построении послойной модели и рассчитать теплогенерацию для интервала глубин 20–30 км (где нет эмпирических данных), которая составит  $0.1746 \text{ мкВт}/\text{м}^3$  (рис. 8, линия 1). На этом же рисунке представлена послойная модель теплогенерации коры (принимая ее среднюю мощность 40 км) — сплошная ступен-

чатая линия и три экспоненциальные модели — пунктирные линии, соответствующие закону аналогичному в уравнении (2).

Для всего Анабарского щита средняя коровая теплогенерация найденная из экспоненциальных моделей, представленных на рисунке 8 составляет: (1)  $0.356 \text{ мкВт}/\text{м}^3$ , (2)  $0.368 \text{ мкВт}/\text{м}^3$ , (3)  $0.563 \text{ мкВт}/\text{м}^3$ . Два первых значения близки к результатам выполненных ранее расчетов ( $0.386 \text{ мкВт}/\text{м}^3$ ), основанных на единичных определениях РАЭ и приближенных расчетах площадей и объемов коровых комплексов (Розен, Милановский, 1988). Оценка радиогенного вклада коры в тепловой поток для ступенчатой модели составит  $14.25 \text{ мВт}/\text{м}^2$ , для экспоненциальных моделей (1)  $10.16 \text{ мВт}/\text{м}^2$ , (2)  $14.70 \text{ мВт}/\text{м}^2$ , (3)  $22.55 \text{ мВт}/\text{м}^2$ . Ранее В.Т. Балобаев (1991) оценил радиогенный вклад коры на Анабаре в  $14 \text{ мВт}/\text{м}^2$ , что практически совпадает с нашей средней оценкой.

Петрологическую оценку коровой теплогенерации сопоставим с геофизическими способами ее оценки для древней коры, проведенной для Восточно-Европейской платформы в работе (Kremenetsky et al., 1989). В связи с большей неоднозначностью связи скорости сейсмических волн с составом пород и теплогенерацией (Fountain, 1986; Rybach, Buntbarth, 1987),

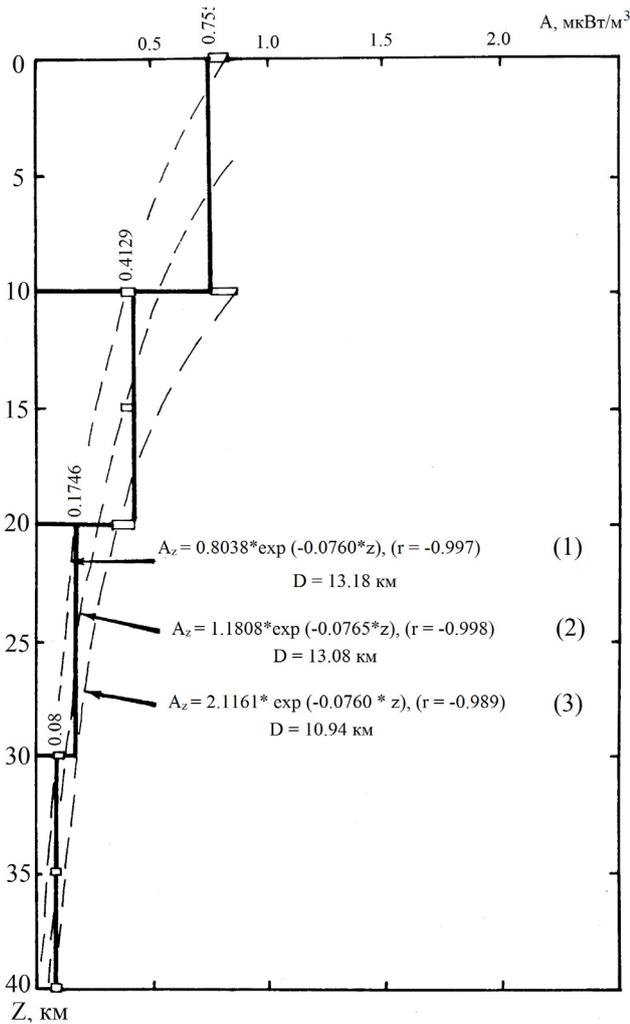


Рис. 8. Коровые модели теплогенерации коры Анабарского щита (пояснения в тексте).

и с учетом полученного нами распределения плотности в коре Анабара, отвечающего наблюдаемому гравитационному полю (рис. 6), воспользуемся формулами связывающими плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) с теплогенерацией ( $A$ , мкВт/м<sup>3</sup>):

$$\ln A = 21.4 - 8.15\rho \quad (3)$$

$$A = 1.4 \exp 5 (2.7 - \rho), \quad (4)$$

где выражение (3) получено в работе (Rybach, Burtbarth, 1984) для докембрийских пород, а выражение (4) для древних платформ взято из работы (Гордиенко, 1980) (рис. 6).

Полученное расчетным образом распределение теплогенерации носит несколько формальный характер. Тем не менее, появляется возможность интегральной оценки вклада коры в тепловой поток и ее средней теплогенерации. Средняя оценка плотности измеренного потока на Анабаре составляет 20–25 мВт/м<sup>2</sup>. Согласно расчетам, проведенным по формулам (3) и (4) (рис. 8), средняя коровая теплогенерация составит 0.17 мкВт/м<sup>3</sup> и 0.4 мкВт/м<sup>3</sup>, что при максимальной мощности коры Анабара 45 км составит 7.65 мВт/м<sup>2</sup> и 18 мВт/м<sup>2</sup>, соответственно.

При полученной из петрологической модели средней коровой теплогенерации 0.36 мкВт/м<sup>3</sup> коровый радиогенный поток  $Q_{45} = 16.2$  мВт/м<sup>2</sup>. Таким образом, формула (4) представляется предпочтительнее для коры Анабара.

Остается открытым вопрос о мантийном потоке на Анабаре, поскольку при 20 мВт/м<sup>2</sup> на поверхности он составит менее 4 мВт/м<sup>2</sup>, что маловероятно. Согласно В.Н. Девяткину (1997) суммарная погрешность определения теплового потока в криолитозоне достигает  $\pm(5-7)$  мВт/м<sup>2</sup>. С учетом нашей оценки, плотность теплового потока на Анабаре составляет  $\geq 30$  мВт/м<sup>2</sup>. В этом случае мы приходим к оценке мантийного потока  $\sim 16 \pm (5-7)$  мВт/м<sup>2</sup>, что соответствует сводке для архейской коры (Хуторской, Поляк, 2016).

Оценка глубинного теплового палеопотока на Анабаре обсуждается в работах (Дучков и др., 1999, Кусков и др., 2014, Розен и др., 2009), где отмечено, что полеопотоки, оцененные по ксенолитам в трубках взрыва (среднепалеозойского и мезозойского возраста), выше измеренных в настоящее время и близки к средним значениям на Восточно-Сибирской платформе (35–45 мВт/м<sup>2</sup>) и средним значениям теплового потока на древних щитах (Хуторской, Поляк, 2016; Artemyeva, Mooney 2001). С учетом отсутствия тектонической активизации на Анабаре за время, прошедшее после выноса ксенолитов, снижением палеопотока за счет уменьшения РАЭ в коре можно пренебречь. Окончательный вывод о современном тепловом режиме Анабара может быть пересмотрен, а измеренный тепловой поток на Анабаре остается предметом дискуссии. Анабарский щит — это реликт древней коры с мощным литосферным килем (Розен и др., 2005), низким мантийным потоком, аномально низкой коровой теплогенерацией и мерзлотой, достигающей мощности 1400 м.

**Температура коры Анабарского щита.** Точность оценки температуры в коре Анабара, связана в первую очередь с неопределенностью величины глубинного теплового потока. С учетом изложенных соображений примем его разброс от 25 до 30 мВт/м<sup>2</sup>, среднюю теплопроводность коры примем постоянной  $\lambda = 2,5$  Вт/м·К, не зависящей от суммарного действия температуры и давления. Формулы расчета температуры в коре  $T(z)$  при поверхностном потоке  $Q_0$  и теплопроводности  $\lambda$  в коре для ступенчатой (5) и экспоненциальной модели (6) теплогенерации  $A$  (мкВт/м<sup>3</sup>):

$$T_{i+1} = T_i + Q_i \cdot \Delta z_i / \lambda - A_i \cdot \Delta z_i^2 / 2\lambda, \quad (5)$$

где  $T_i$  — температура на кровле  $i$ -го слоя модели мощностью  $\Delta z_i$  с теплогенерацией  $A_i$ . Температуру на дневной поверхности ( $i = 0$ ) примем равной  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ :

$$T(z) = T_0 + (Q_0 - A_0 D) \cdot z / \lambda + D^2 \cdot A_0 (1 - \exp(-z/D)) / \lambda. \quad (6)$$

Расчетные температуры на уровне 40 км для тепловых потоков на поверхности равных 25 и 30 мВт/м<sup>2</sup>, соответственно, составят для ступенчатой модели  $T_{40} = 246^{\circ}\text{C}$  и  $329^{\circ}\text{C}$ , для экспоненциальной модели: №(2) ( $A_0 = 1.18$  мВт/м<sup>3</sup>,  $D = 13.08$  км)  $T_{40} = 286^{\circ}\text{C}$  и  $T_{40} = 310^{\circ}\text{C}$ . Для глубины 45 км температура возрастет в среднем на  $30^{\circ}\text{C}$ . Мантийный поток играет существенную роль в тепловом режиме коры Анабара. Его нижняя оценка 10–11 мВт/м<sup>2</sup> и верхняя 15–16 мВт/м<sup>2</sup>. Диапазону глубин 20–25 км соответствует температурный диапазон  $150\text{--}225^{\circ}\text{C}$ . Рост температуры на уровне 40 км при увеличении потока с 25 до 30 мВт/м<sup>2</sup> достигает  $\sim 80^{\circ}\text{C}$  для ступенчатой модели и  $25^{\circ}\text{C}$  для экспоненциальной.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило подчеркнуть геофизические особенности строения коры Анабарского щита, обусловленные его геологической историей. Коллизионная природа строения коры Анабара нашла отражение в сейсмической и гравитационной моделях. Модели коровой теплогенерации получены на основе петролого-геофизических данных. Средняя теплогенерация коры Анабара сопоставима с теплогенерацией нижней континентальной коры. Крайне низкая коровая теплогенерация в сочетании с низким мантийный тепловым потоком и особенностями палеоклимата, способствовали формированию мощной мерзлоты на Анабаре и его склонах.

Измеренные тепловые потоки, на Анабаре требуют ввода поправок, включая палеоклиматическую. Неопределенность величины измеренного теплового потока порождает разброс прогнозных температур на уровне Мохо. Имеющиеся в литературе оценки температуры на Мохо Анабарского щита представляются заниженными, мы склоняемся к оценке  $310\text{--}330^{\circ}\text{C}$  на глубине 40 км и порядка  $350^{\circ}\text{C}$  на уровне 45 км.

Авторы выражают благодарность А.Д. Дучкову за интерес к работе.

### Список литературы

*Алейников А.Л., Немзоров Н.И., Халевин Н.И.* Многоволновая сейсмика при изучении недр рудных районов / Отв. ред. А.М. Буньков. М.: Наука, 1986. 109 с.

*Алексеев С.В.* Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Дисс. докт. геол.-мин. наук. Иркутск, 2007. 376 с.

*Андреева С.М.* Зырянское оледенение на севере средней Сибири // Известия АН СССР. Серия географическая. 1978. № 5. С. 72–79.

Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ отработанным в период с 1972 по 1995 год Роснедра: ВСЕГЕИ, 2013 (электронное издание). <http://www.vsegei.ru/ru/info/seismic/>.

*Балобаев В.Т.* Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 193 с.

*Балобаев В.Т.* Тепловой поток Сибирской платформы в зоне вечной мерзлоты // Тепловое поле недр Сибири / Ред. Э.Э. Фотиади. Новосибирск: Наука, 1987. С. 75–94.

Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока (2009–2015). 2016. <http://maps.nrcgit.ru/geoterm/>.

*Герасимчук А.В., Серенко В.П.* Вещественно-физические предпосылки районирования фундамента Далдыно-Алакитского региона по геофизическим данным // Советская геология. 1988. № 11. С. 74–80.

*Гордиенко В.В.* Радиогенная теплогенерация в земной коре и тепловой поток из мантии древних платформ // Геофизический журнал. 1980. Т. 2. № 3. С. 29–34.

*Девяткин В.Н.* Тепловой поток криолитозоны Сибири. Автореф. дисс. докт. геол.-мин. наук. М.: Ин-т криосферы, 1997. 39 с.

*Девяткин В.Н.* Тепловой поток криолитозоны Сибири: методика и результаты изучения. Новосибирск: Наука, 1993. 163 с.

*Демежко Д.Ю.* Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 144 с.

*Дучков А.Д., Балобаев В.Т., Лысак С.В.* Тепловой поток Сибири // Геология и геофизика. 1982. № 1. С. 42–51.

*Дучков А.Д., Пузанков Ю.М., Соколова Л.С.* Тепловой поток кимберлитовых провинций древних платформ // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 7. С. 1092–1101.

*Дучков А.Д., Соколова Л.С.* Тепловой поток Сибири // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции посвященной 100 летию со дня рождения академика Н.Н.Пузырева (Новосибирск 8–13 декабря 2014 г.). Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. С. 211–216.

*Егоркин А.В.* Глубинные сейсмические исследования с трехкомпонентной регистрацией смещения почвы // Физика Земли. 1999. № 7–8. С. 44–64.

*Егоркин А.В.* Строение земной коры по сейсмическим геотравесам // Глубинное строение территории СССР / Ред. В.В. Белоусов, Н.И. Павленкова. М.: Наука, 1991. С. 118–135.

*Зорин Ю.А., Письменный Б.М., Новоселова М.Р., Турутанов Е.Х.* Декомпенсационные анома-

- лии силы тяжести // Геология и геофизика. 1985. № 8. С. 104–108.
- Кабан М.К.* Гравитационная модель литосферы и геодинамика (плотностные неоднородности литосферы и ее напряженное состояние) // Неотектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / Под. ред. А.Ф. Грачева. М.: Пробел, 2000. С. 267–290.
- Кусков О.Л., Кронрод В.А., Прокофьев А.А., Павленкова Н.И.* Петролого-геофизические модели внутреннего строения литосферной мантии Сибирского кратона. Петрология. Т. 22. № 1. С. 21–49.
- Любимова Е.А., Милановский С.Ю., Смирнова Е.В.* Новые результаты изучения теплового потока на Балтийском щите // История развития теплового поля в зонах различного режима стран Восточной Европы / Отв. ред. Е.А. Любимова и В.И. Шульдинер, М.: Изд. МГК, 1985. С. 93–110.
- Пискарев А.П.* Применение петрофизических исследований при изучении геологического строения Анабарского щита // Петрофизическая характеристика советской части Балтийского щита / Отв. ред. В.А. Тюремнов (отв. ред.) и др. Апатиты: Кольский филиал РАН СССР, 1976. С. 17–24.
- Розен О.М.* Теплогенерация земной коры Анабарского щита и проблемы формирования нижней коры континентов // Геология и геофизика. 1992. № 12. С. 22–29.
- Розен О.М.* Метаморфические следствия тектонических движений на уровне нижней коры: протерозойские коллизионные зоны и террейны Анабарского щита // Геотектоника. 1995. № 2. С. 3–14.
- Розен О.М., Е.В. Бибикина, В.Л. Злобин и др.* Архей Анабарского щита и проблемы ранней эволюции Земли. М.: Наука, 1988. 254 с.
- Розен О.М., Вишневский А.Н., Глуховский М.З. и др.* Строение земной коры Анабарского щита. М.: Наука, 1986. 198 с.
- Розен О.М., Ленский Л.К., Журавлев Д.З. и др.* Палеопротерозойская аккреция на северо-востоке Сибирского кратона: изотопное датирование анабарской коллизионной системы // Стратиграфия. геологическая корреляция. 2006. Т. 14. № 6. С. 3–24.
- Розен О.М., Манаков А.В., Суворов В.Д.* Коллизионная система северо-востока Сибирского кратона и проблема алмазоносного литосферного кила // Геотектоника. 2005. № 6. С. 42–67.
- Розен О.М., Милановский С.Ю.* Тепловой поток в докембрии Анабарского и Балтийского щитов: некоторые геологические следствия // В сб. Геология метаморфических комплексов. Свердловск: Свердловский горный ин-т, 1988. С. 24–34.
- Розен О.М., Ножкин А.Д., Злобин В.Л., Рачков В.С.* Распределение радиоактивных элементов в метаморфитах Анабарского щита: происхождение пород и эволюция земной коры // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1989. Т. 64. Вып. 4. С. 78–91.
- Розен О.М., Рачков В.С., Злобин В.Л.* Анабарский щит. В сб. Тектоническая расслоенность литосферы / Под ред. Никитиной Т.А. М.: Наука, 1990. С. 269–279.
- Розен О.М., Соловьев А.В., Журавлев Д.З.* Термаль-ная эволюция северо-востока Сибирской платформы в свете данных трекового датирования апатитов из ядра глубоких скважин // Физика Земли. 2009. № 10. С. 79–96.
- Розен О.М., Федоровский В.С.* Коллизионные гранитоиды и расслоение земной коры. М.: Научный мир, 2001. 188 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 545).
- Самков В.В., Потапов С.В.* Интерпретация гравитационного поля и данных глубинного сейсмического зондирования // Строение земной коры Анабарского щита / Отв. ред. В.М. Моралев. М.: Наука, 1986. С. 134–154.
- Тепловое поле недр Сибири / Редактор Э.Э. Фоти-ади Новосибирск: Наука, 1987. 200 с.
- Теплофизические исследования криолитозоны Сибири / Отв. Редактор А.В. Павлов. Ново-сибирск: Наука, 1983. 215 с.
- Хуторской М.Д., Поляк Б.Г.* Роль радиогенной теплогенерации в формировании поверх-ностного теплового потока // Геотектоника. 2016. № 2. С. 43–61.
- Artemieva I.M., Mooney W.D.* Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // JGR. 2001. V. 106. № B8. P. 16387–16414.
- Artemjev M.E., Kaban M.K., Kucherinenko V.A. et al.* Subcrustal density inhomogeneities of the Northern Eurasia as derived from the gravity data and isostatic models of the lithosphere // Tectonophysics. 1994. V. 240. № 1–4. P. 249–280.
- Condie K.* Plate tectonics and crustal evolution. Oxford: Pergamon Press, 1989, 476 p.
- Christensen N.I., Mooney W.D.* Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view // JGR. 1995. V. 100. № B7. P. 9761–9788.
- Cordell L., Zorin Yu.A., Keller G.R.* The decompensative gravity anomaly and deep structure of the Rio Grande Rift // JGR. 1991. V. 96. № B4. P. 6557–6568.
- Demezhko D.Y., Ryvkin D.G., Outkin V.I., et al.* Spatial distribution of Pleistocene // Holocene warming amplitudes in Northern Eurasia inferred from geothermal data. Climate of the Past. 2007. № 3. P. 559–568.
- Egorkin A.V.* Velocity structure, composition and discrimination of crustal provinces in the former

- Soviet Union // *Tectonophysics*. 1998. V. 298. № 4. P. 395–404.
- Fountain D.M.* Is there a relationship between seismic velocity and heat production for crustal rocks? // *Earth and Planetary Science Letters*. 1986. V. 1. 79. № 1–2. P. 145–150.
- Jordan T.H.* Continents as a chemical boundary layer // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. London 1981. V.301. № 1461. P. 359–373.
- Kremenetsky A.A., Milanovsky S.Yu., Ovchinnikov L.N.* A heat generation model for continental crust based on deep drilling in the Baltic Shield // *Tectonophysics*. 1989. V. 159. № 3 P. 231–246.
- Lachenbruch A. H.* Crustal temperature and heat production: implications of the linear heat flow relation // *JGR*. 1970. V. 75 (B4). P. 3291–3300.
- Meissner R.* The continental crust. Academic Press Inc. Orlando San Diego N. Y. Toronto, 1986. 402 p.
- Mottaghy D., Schwamborn G., Rath V.* Past climate changes and permafrost depth at the Lake El'gygytyn site implications from data and thermal modeling // *Climate of the Past*. 2013. V. 9. P. 119–133.
- Pollack H.N., Demezhko D.Y., Duchkov A.D. et al.* Surface temperature trends in Russia over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures // *JGR*. 2003. V. 108 (B4). P. 2180–2192.
- Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R.* A new global heat flow compilation. 1991. Department of geological sciences the University of Michigan Ann Arbor, Michigan 48109–1063, U.S.A. [http://www.wdcb.ru/sep/data/hdata/hf\\_global.dat](http://www.wdcb.ru/sep/data/hdata/hf_global.dat).
- Rudnick R.L., Presper T.* Geochemistry of intermediate- to high-pressure granulites // *Granulites and crustal evolution / D. Vielzeuf, P. Vidal (Eds.)*. Kluwer, Dordrecht, 1990. P. 523–550.
- Rybach L., Bunterbarth G.* Relationships between petrophysical properties density, seismic-velocity, heat generation and mineralogical constitution // *Earth and Planetary Science Letters*. 1982. V. 57. № 2. P. 367–376.
- Rybach L., Buntebarth G.* The variation of heat generation, density and seismic velocity with rock type in the continental lithosphere // *Tectonophysics*. 1984. V. 103. № 1–4. P. 335–344.
- Rybach L., Bunterbarth G.* The relationship between seismic velocity and heat production- critical comments // *Earth and Planetary Science Letters*. 1987. V. 83. № 1–2. P. 175–177.
- Shatsky V.S., Budnick R.L., Jagoutz E.* Mafic granulite xenoliths from Udachnaya Pipe, Yakutia: samples of Archaean lower crust? Deep-seated magmatism and evolution of lithosphere of the Siberian Platform, abstracts. Novosibirsk: IGG, 1990. P. 35–51.

## GEOPHYSICAL FEATURES OF THE ANABAR SHIELD CRUST

S.Yu. Milanovskiy<sup>1</sup>, M.K. Kaban<sup>1,2</sup>, O.M. Rozen<sup>3</sup>, A.V. Egorkin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242*

<sup>2</sup>*Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences Telegrafenberg Potsdam, Germany*

<sup>3</sup>*Geological Institute, Russian Academy of Science, Moscow, 119017*

<sup>4</sup>*GEON Center, Moscow*

In terms of the Anabar Shield investigation the authors studied seismic, gravity, and thermal characteristics of granulitic zones in the earth crust. Lower crustal complexes of the Anabar shield uplifted to the Earth surface are subdivided into passive (terranes) and active (collision zones) tectonic unites. The detailed structure of the SE zone of the Anabar Shield and the adjacent zones, which are characterized by vertical and lateral heterogeneity, was created along the DSS profile «Shpat» (Vp and Vs waves). Gravity field of the crust within the Anabar Shield is characterized by linear maxima of NW–SE course and coinciding maxima with zones of granulitic terranes. Special analysis of gravity field gives the same direction of inclination of high-density blocks in the crust as that found from the surface geology and seismic crustal model. The Anabar Shield is characterized by very low measured heat flow density: 20 to 25 mW/m<sup>2</sup>. We estimate deep heat flow on Anabar as minima  $\sim 30 \pm (5-7)$  mW/m<sup>2</sup>. The average crustal heat production in the Anabar Shield was estimated to be 0.36 mW/m<sup>3</sup>, this value is typical for the lower crust. Mantle heat flow density is 10–16 mW/m<sup>2</sup>. Moho temperature on the Anabar Shield is about  $330 \pm 20$  °C. Spatial relationship between high permafrost thickness (up to 1500m) on the Anabar Shield and its slope is caused by anomalous low heat flow and glacial epoch.

*Keywords: Anabar Shield, seismic structure, gravity field, heat flow.*