

ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 550.83

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА КОРЫ АРХЕЙСКИХ КРАТОНОВ ЮЖНЫХ МАТЕРИКОВ:  
СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ

А.А.Баранов<sup>1,2</sup>, А.М. Бобров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, Москва, ул. Бол. Грузинская, 10, Россия

<sup>2</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,  
117485, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, Россия

В работе собраны и проанализированы данные о строении и свойствах коры 13 архейских кратонов южных материков, ранее входивших в Гондвану (кратоны Африки, Австралии, Антарктиды и Южной Америки, а также Индийского субконтинента). Сводные данные по кратонам представлены в итоговой таблице. Исследованы следующие параметры кратонов: глубина границы Мохо, площадь, возраст, мощность осадков, рельеф, мощность литосферы.

Площадь разных кратонов отличается в десятки раз: от 0.05 млн км<sup>2</sup> (кратон Нейпир) до 4 млн км<sup>2</sup> (кратон Конго). Диапазон возраста пород кратонов покрывает почти весь архей: 3.8—2.5 млрд лет. Осадки в основном незначительны, однако для кратонов Конго и Западно-Африканского их мощность достигает 7 км. Рельеф поверхности кратонов также меняется от 0 до 2 км. Наблюдаются кратоны с высоким стоянием, их средняя высота превышает 1 км: Каапвааль, Зимбабве и Танзанийский.

Уточнены карты Мохо для ряда кратонов (на основе сейсмических данных). Построены диаграммы распределений глубин Мохо для каждого кратона. Обработка и анализ имеющихся новых данных показали, что средняя глубина до Мохо меняется от 33 до 44 км: Пилбара (33 км), Грюнегона (35 км), Сан-Франциско (36 км), Йилгарн (37 км), Дарвар (38 км), Танзанийский (39 км), Зимбабве (39 км), Каапвааль (40 км), Голер (40 км), Нейпир (40 км), Западно-Африканский кратон (40 км), Конго (42 км), Амазонский (44 км).

Показано, что глубина до Мохо более неоднородна в пределах кратонов, чем считалось ранее. Найдено, что диапазон изменений Мохо весьма широк — от 28 до 52 км. Полученные результаты существенно отличаются от ранее сделанных другими авторами выводов о том, что граница Мохо для архейских кратонов относительно плоская.

Результаты работы также показывают отличие коры раннего и среднего архея от более поздней по мощности: участки недеформированной ранне- и среднеархейской коры имеют неглубокое Мохо (28—38 км), в то время как позднеархейская или же деформированная кора имеет глубины Мохо до 52 км.

*Архей, кратон, кора, Мохо.*

CRUSTAL STRUCTURE AND PROPERTIES OF ARCHEAN CRATONS  
OF GONDWANALAND: SIMILARITY AND DIFFERENCE

A.A. Baranov and A.M. Bobrov

This is a synopsis of available data on the crustal structure and properties of thirteen Archean cratons of Gondwanaland (the cratons of Africa, Australia, Antarctica, South America, and the Indian subcontinent). The data include estimates of surface area, rock age and lithology, Moho depth, thickness of lithosphere and sediments, as well as elevations, all summarized in a table. The cratons differ in size from  $0.05 \times 10^6$  km<sup>2</sup> (Napier craton) to  $4 \times 10^6$  km<sup>2</sup> (Congo craton) and span almost the entire Archean period from 3.8 to 2.5 Ga. Sediments are mostly thin, though reach 7 km in the Congo and West African cratons. Elevations above sea level are from 0 to 2 km; some relatively highland cratons (Kaapvaal, Zimbabwe, and Tanzanian) rise to more than 1 km. On the basis of regional seismic data, the Moho map for cratons has been improved. The Moho diagrams for each craton are constructed. The analysis of the available new data shows that the average Moho depth varies from 33 to 44 km: Pilbara (33 km), Grunehogna (35 km), Sro Francisco (36 km), Yilgarn (37 km), Dharwar (38 km), Tanzanian (39 km), Zimbabwe (39 km), Kaapvaal (40 km), Gawler (40 km), Napier (40 km), West Africa (40 km), Congo (42 km), and Amazon (44 km) cratons. The Moho depth within the cratons is less uniform than

it was assumed before: from 28 to 52 km. The new results differ significantly from the earlier inference of a relatively flat Moho geometry beneath Archean cratons. According to the new data, early and middle Archean undeformed crust is characterized by a shallow Moho depth (28–38 km), while late Archean or deformed crust may be as thick as 52 km.

*Archean, craton, crust, Moho*

---

## ВВЕДЕНИЕ

Континентальная кора является наиболее неоднородной частью Земли, и ее влияние скрывает эффект неоднородностей в мантии, влияющих на гравитационное поле и другие поля. Это обусловлено как различной мощностью континентальной коры, так и ее отличающимися свойствами в разных континентальных регионах. Мощность нормальной континентальной коры меняется от 30 до 75 км. Наиболее древние участки земной коры — это архейские кратоны, которые имеют возраст более 2.5 млрд лет. Для сравнения возраст океанического дна не превышает 200 млн лет. Древние участки земной коры — свидетельства эволюции Земли за огромный срок. Изучение их строения и эволюции в прошлом представляют огромный интерес для наук о Земле. Кроме того, крупнейшие химические неоднородности, наряду со слоем D" в мантии — это именно участки древней континентальной коры и литосфера под ними. Составляющими единицами архейских кратонов являются: древние гнейсовые комплексы, зеленокаменные пояса, гранулитогнейсовые области, интракратонные седиментогенные бассейны, реже мобильные пояса. В большинстве архейских кратонов выделяются крупные области развития двух разновозрастных групп пород: древней и более молодой. Так, в кратонах Дарвар, Западно-Африканском и Йилгарн западные области оказываются древнее, чем восточные, а в кратонах Пилбара, Голер, Каапвааль и Зимбабве такая полярность имеет противоположный знак. Кратоны Нейпир и Грюнегона являлись частями Дарвар и Каапвааль кратонов соответственно и не нарушают этой закономерности. Для Танзанийского кратона северная часть является более молодой по сравнению с южной. Из других архейских кратонов Гондваны такое двучленное деление не наблюдается для Амазонского, Сан-Франциско и Конго. Следует также отметить, что до распада Гондваны кратон Сан-Франциско был частью кратона Конго.

В последнее время происхождение, рост и эволюция архейской коры является предметом интенсивных исследований. Понимание природы архейской коры и ее геологической эволюции остается неполным из-за недостаточного знания о мощности и составе недеформированной архейской коры. Глобальный обзор сейсмических данных [Durrheim, Mooney, 1991] показывает, что протерозойская кора в основном имеет мощность 40—55 км, в то время как архейская только 27—40 км. Было отмечено, что протерозойская кора в разы чаще содержит высокоскоростной слой ( $v_p$  больше 7 км/с) в нижней коре. Также этот слой имеет большую мощность для протерозойской коры.

В работе [Abbott et al., 2013] рассмотрены свойства средnearхейской недеформированной коры по сравнению с более поздней на примере кратонов Каапвааль и Зимбабве. Показано, что для такой коры характерно плоское, неглубокое Мохо (32—39 км), а также резкий скачок скоростей на границе Мохо при незначительных скачках на внутренних границах. Для большей части поздnearхейской коры характерны те же особенности. Протерозойская кора имеет среднее Мохо около 41 км и менее резкий скачок скоростей на этой границе. Для послearхейской коры характерно наличие высокоскоростного слоя нижней коры. Предполагается, что нижняя часть архейской коры испытала деляминацию. Из недостатков работы следует отметить неполную репрезентативность, так как исследуется только часть архейских областей Земли: Канадский щит, Западная Австралия и Южная Африка.

В настоящей работе анализируются мощности коры кратонов южных континентов, которые раньше входили в Гондвану, — Африки, Австралии, Антарктиды и Южной Америки, а также Индийского субконтинента.

Отметим, что несмотря на то, что кратоны находятся внутри современных литосферных плит, несколько из них имели в момент существования Пангеи общие границы, а значит, частично и общую геологическую историю (как минимум с момента образования Пангеи до отделения от нее соответствующей части) и как следствие общее строение и свойства коры.

Необходимость настоящей работы вызвана следующим. Во-первых, в отечественной литературе не существует современного системного описания архейских кратонов, а тем более кратонов южных материков. Поэтому в данной работе для каждого кратона приведено краткое описание его вещественного состава со ссылками на фактические данные. Во-вторых, были систематизированы и проанализированы фактические данные о мощности коры для каждого кратона. Цель анализа — исследовать, как связана мощность коры кратона с его возрастом и эволюцией.

Границы кратонов взяты и оцифрованы из следующих работ: для Африки [Begg et al., 2009], Австралии [Salmon et al., 2013], Южной Америки [Chulick et al., 2013], Антарктиды [Bayer et al., 2009; Kanao et al., 2011], Индии [Gupta et al., 2003]. В тексте статьи добавлены соответствующие пояснения. Эти авторы для определения границ состава пород и размеров кратонов использовали методы региональной тектоники, геохронологии, а также данные магнитных, сейсмических и гравитационных измерений.

## АФРИКАНСКИЕ КРАТОНЫ

Африка — древний континент и имеет большую площадь щитов. Согласно данным, приведенным в обширной работе [Begg et al., 2009], как единое целое Африка сформировалась около 600 млн лет назад и образовалась Африканская платформа. Африканская платформа — докембрийская древняя платформа, один из крупнейших относительно устойчивых участков земной коры. Она занимала территорию почти всей Африки, за исключением южной части (Капская область, ЮАР) и северо-западной части (Атласские горы, Марокко). Образовалась в результате объединения Конголезской, Калахарской, Сомалийской, Центрально-Африканской и Западно-Африканской протоплатформ [Pasyanos, Nyblade, 2007]. По данным сейсмической томографии, под Африкой находится большой мантийный плюм (African Superswell), который ответствен за многочисленные рифтовые системы континента [Ritsema, van Heijst, 2000]. Поэтому в Восточной Африке литосфера утонена даже под Танзанийским кратоном. В других местах континента мощность литосферы под кратонами достигает 200—250 км

Африка включает в себя пять древних кратонов архейского возраста: кратон Конго (около 4 млн км<sup>2</sup>), Западно-Африканский кратон (2.9 млн км<sup>2</sup>), кратон Каапвааль (0.55 млн км<sup>2</sup>), Танзанийский кратон (0.39 млн км<sup>2</sup>), кратон Зимбабве (0.24 млн км<sup>2</sup>). Западно-Африканский (средняя глубина границы Мохо 40 км) и Конго кратоны (среднее Мохо 42 км) имеют огромные размеры и осадочные бассейны внутри с мощностью осадков до 6 км. Три остальных африканских кратона — Танзанийский, Зимбабве и Каапвааль — существенно меньше и имеют среднее Мохо 39, 39 и 40 км соответственно. Для них мощность осадков невелика. Геологическая история континента, по-видимому, началась 3.5—3.7 млрд л. н. с формирования раннеархейских блоков коры. Далее в среднем архее (3.15—2.75 млрд л. н.) происходил рост кратонных блоков земной коры. В позднем архее (2.75—2.5 млрд л. н.) произошла стабилизация архейской коры кратонов, а также слияние кратона Зимбабве и Каапвааль в единый кратон Калахари [Moser et al., 2001; Zeh et al., 2009]. Африка, кроме южной ее части, плохо покрыта сейсмическими данными. За основу карты глубин до границы Мохо для Африки мы взяли глобальную модель CRUST 1.0 [Laske et al., 2013]. Этот выбор обусловлен тем, что хотя глобальная модель CRUST 1.0 малодетальна, но существующие региональные модели коры для Африки еще менее обоснованы. В работах [Tedla et al., 2011; Bagherbandi, Sjoberg, 2012] построены модели глубин до Мохо на основе гравитационных данных, и они не могут считаться априори верными. В работе [Pasyanos, Nyblade, 2007] построена модель карты Мохо для Африки на основе данных о распространении поверхностных волн. Однако она содержит явно заниженные значения глубин до Мохо для большинства районов Африки. Так, например, огромные области западной и центральной части Африки имеют глубину до границы Мохо в 28 км и менее, что явно мало, и эта модель противоречит имеющимся редким измерениям глубины до границы Мохо на основе сейсмических данных. Поэтому мы уточнили карту глубин до Мохо из модели CRUST 1.0 для каждого кратона на основе региональных сейсмических данных. На рис. 1 показана карта Мохо для Африки из модели CRUST 1.0 [Laske et al., 2013] с уточнениями для каждого из африканских кратонов. На ее фоне черной линией выделены и подписаны пять африканских кратонов: Западно-Африканский [Pasyanos, Nyblade, 2007], Конго [Wingate et al., 2010], Танзанийский [Weeraratne et al., 2003], Каапвааль и Зимбабве [James et al., 2003]. Средняя глубина до Мохо для Африки в целом на основе уточненной для кратонов карты глубин до Мохо составляет 38 км (стандартное отклонение 4.6 км), в то время как в модели карты глубин до Мохо из работы [Pasyanos, Nyblade, 2007] средняя глубина составляет всего 30 км, а для модели CRUST 1.0 средняя глубина до Мохо для Африки составляет 37 км. Границы африканских кратонов взяты и оцифрованы авторами из работы [Begg et al., 2009].

**Западно-Африканский кратон** имеет возраст 3.5—2.7 млрд лет и площадь 2.9 млн км<sup>2</sup> и изучен относительно мало [Attoh, Ekwueme, 1997; Begg et al., 2009]. Архейские породы обнажаются на севере (Региабатский щит) и на юге (Эбюрнейский щит). По возрасту и строению их породы схожи между собой, что предполагает продолжение архейского основания под осадочным бассейном Тауденни. Западная часть щитов состоит из мигматитовых ортогнейсов (3.5 млрд лет) и зеленокаменных поясов (3.3—3.1 млрд лет), тогда как в восточной части щитов присутствуют различные архейские породы, прошедшие метаморфизм на рубеже 2.9—2.7 млрд лет [Potrel et al., 1996]. Осадочный бассейн Тауденни состоит из пород возраста от неопротерозоя до палеозоя. Рельеф меняется от 0 до 800 м, тогда как мощность осадков от 0 (Региабатский и Эбюрнейский щиты) до 7 км (бассейн Тауденни). Глубина до границы Мохо варьирует от 37 км для Региабатского щита до 43 км для осадочного бассейна Тауденни [Sandvol et al.,

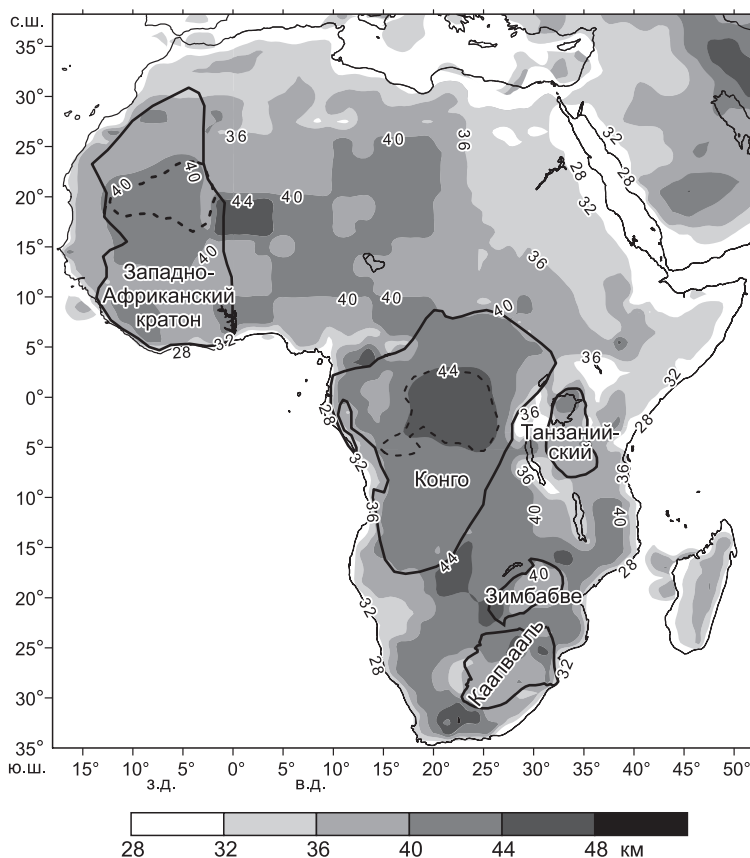
### Рис. 1. Африканские кратоны на карте Мохо.

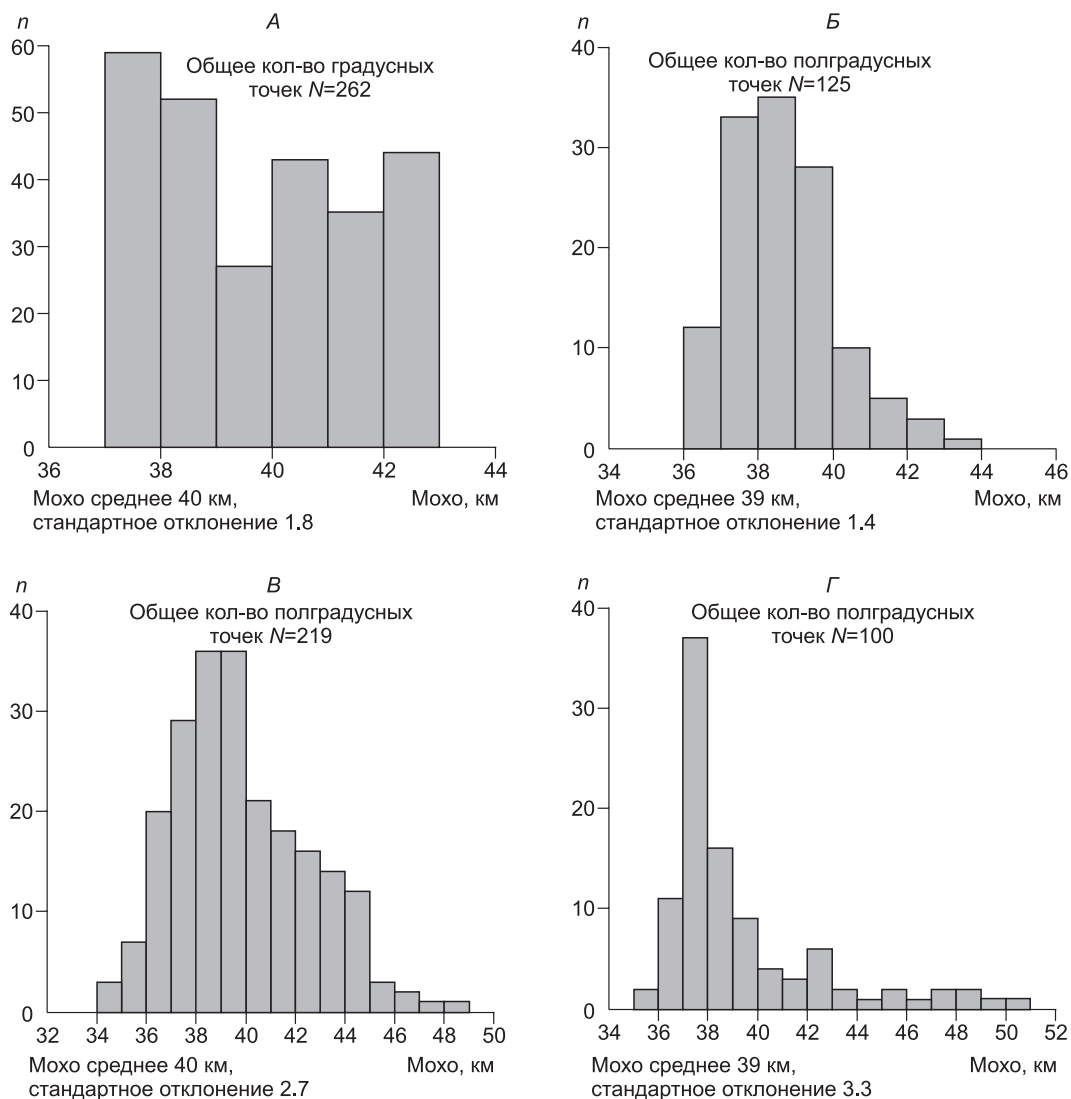
Их границы обозначены черной жирной линией на фоне карты Мохо, а осадочные бассейны внутри кратонов пунктирной.

1998; Gangopadhyay et al., 2007]. Среднее значение Мохо для Западно-Африканского кратона составляет 40 км, а стандартное отклонение 1.8 км. Мощность литосферы под кратоном составляет 200—250 км. На рис. 2, А показана диаграмма распределения Мохо для Западно-Африканского кратона (здесь и далее, если не указано отдельно, диаграммы строятся по массиву данных с шагом в один градус).

**Танзанийский кратон:** возраст 2.9—2.5 млрд лет, площадь 0.4 млн км<sup>2</sup> [Borg, Shackelton, 1997; Manya, Maboiko, 2003; Begg et al., 2009]. Этот блок архейской коры состоит из двух различных частей, границей между ними служит пояс Додома северо-западного простирания с возрастом гранитов 2.6—2.5 млрд лет. Северный блок архейской коры преимущественно состоит из гранитов возраста 2.8—2.6 млрд лет с глубиной расположения границы Мохо до 44 км [Dugda et al., 2005; Julià et al., 2005]. Южный блок кратона более древний, содержит гнейсы и связанные с ними гранитоиды с возрастом 2.93—2.85 млрд лет и имеет глубину до границы Мохо в диапазоне 36—40 км. Согласно диаграмме распределения глубин Мохо (см. рис. 2, Б), среднее значение Мохо для Танзанийского кратона составляет 39 км, стандартное отклонение 1.4 км. Рельеф меняется от 1100 до 1800 м. Такая приподнятость поверхности кратона может быть результатом действия плюмов вокруг кратона, т. е. так называемая динамическая топография. Мощность осадков Танзанийского кратона составляет от 0 до 200 м. Мощность литосферы под кратоном составляет около 150 км, что существенно меньше, чем под другими африканскими кратонами [Chesley et al., 1999; Griffin et al., 2003]. На рис. 2, Б показана диаграмма распределения Мохо для Танзанийского кратона, построенная на основе карты Мохо на сетке с шагом в полградуса.

**Кратон Каапвааль** расположен в южной части Африканской платформы и достаточно хорошо изучен. Возраст его различных частей меняется от 3.7 до 2.6 млрд лет, а площадь составляет около 0.5 млн км<sup>2</sup> [Begg et al., 2009]. Состоит кратон преимущественно из гранитоидов с гнейсами, а также зеленокаменных поясов и делится на несколько блоков со сложным строением. Юго-восточная часть кратона содержит древнейшие породы, в том числе 3.7—3.2 млрд лет гнейсы (гнейсовый комплекс Свазиленд), и зеленокаменный пояс Барбертон с возрастом 3.1—3.0 млрд лет [Kröner, Tegtmeier, 1994]. Он перекрывается осадочными породами бассейна Пангола с возрастом 3.10—2.87 млрд лет и породами бассейнов Витватерсранд (3.07—2.70 млрд лет) и Вентерсдорп (2.7—2.6 млрд лет). Центральная часть кратона северо-восточного простирания состоит из гнейсов с возрастом 3.34—3.00 млрд лет, которые испытали метаморфизм на рубеже 2.6 млрд лет [Begg et al., 2009]. Террейн Питтсбург состоит из ТТГ пород и зеленокаменных поясов с возрастом 2.9—2.8 млрд лет. Западные части этих трех террейнов частично перекрыты супракрустальными породами возраста 2.85—2.66 млрд лет и бассейном Трансвааль позднеархейского возраста (2.6—2.5 млрд лет). Четвертая часть кратона — так называемый Западный террейн — состоит из гнейсов, гранитоидов (3.25—2.88 млрд лет) и зеленокаменных поясов (3.00—2.78 млрд лет). На севере кратона присутствует раннепротерозойская магматическая провинция Бушвельд с возрастом пород 2.06—2.05 млрд лет. Мохо для кратона Каапвааль неоднородно и меняется с 34 до 49 км [James et al., 2003; Stankiewicz, de Wit, 2013; Youssouf et al., 2013]. Свазиленд и северо-восточная часть кратона имеет глубину Мохо 44—48 км. Кора центральной и южной части кратона имеет Мохо 34—44 км для бассейна Вентерсдорп и 36—44 км для бассейна Витватерсранд, с минимумом в 34





**Рис. 2.** Диаграмма распределения глубин Мохо для четырех кратонов: Западно-Африканского (А), Танзанийского (Б), Каапвааль (В) и Зимбабве (Г).

Здесь и далее:  $n$  — количество точек градусной сетки (в пределах кратона), имеющих глубины Мохо в километровых диапазонах соответствующих значений абсцисс.

км для области Вредефорт [Youssof et al., 2013]. Глубокое Мохо (45—48 км) выявлено для магматической провинции Бушвелд. Западная часть кратона и террейн Питтсбург характеризуется глубиной Мохо около 34—39 км [James et al., 2003]. Северная граница кратона с поясом Лимпопо характеризуется резким углублением Мохо с 34—39 до 41—46 км. Для позднеархейского пояса Лимпопо Мохо примерно однородно (42—46 км), уменьшаясь только в восточной части до 35 км. Среднее значение Мохо для кратона Каапвааль составляет 40 км, стандартное отклонение 2.7 км. Рельеф меняется от 0 до 2000 м. Мощность осадков кратона Каапвааль меняется от 0 до 2700 м (внутренние осадочные бассейны). Мощность литосферы под кратоном 200—250 км [Ritsema, van Heijst, 2000; Begg et al., 2009]. На рис. 2, В показана диаграмма распределения Мохо для кратона Каапвааль, построенная на основе карты Мохо на сетке с шагом в полградуса.

**Кратон Зимбабве** также расположен в южной части Африканской платформы севернее кратона Каапвааль. Возраст зеленых сланцев, гранитов и гнейсов кратона Зимбабве варьирует от 3.7 до 2.6 млрд лет [Frei et al., 1999], а площадь составляет около 0.25 млн км<sup>2</sup>. Ядро кратона сложено гранитогнейсами тоналитового состава, выше которых залегают складчатые осадочно-вулканогенные комплексы зеленокаменных поясов нижнего и верхнего архея, прорванные архейскими тоналитами, гранитами и основными интрузиями [Begg et al., 2009]. Кратон окружен тремя самостоятельными орогеническими пояса-

ми: с северо-запада — подвижным поясом Магонди с возрастом деформаций 2000-1800 млн лет; севера и востока — подвижным поясом Зимбабве (1000—500 млн лет), с юга архейским гранулитовым комплексом Лимпопо [Begg et al., 2009; Youssof et al., 2013]. Юго-восточная часть кратона самая древняя — блок Токва, состоящий в основном из гнейсов с возрастом 3.4—3.7 млрд лет [Smith et al., 2009]. Для блока Токва Мохо меняется в пределах 36—38 км [Youssof et al., 2013]. Эта часть кратона представляет собой участок недеформированной архейской коры, сохранившейся до наших дней. Последнее известное событие в этой части кратона Зимбабве — внедрение Великой Дайки в позднем архее. Также для этого блока характерен резкий скачок на границе Мохо. Западная часть кратона имеет глубокое Мохо (46—48 км). Утолщенная кора в западной части кратона Зимбабве связана с деформацией и метаморфизмом архейских пород.

На рис. 2, Г показана диаграмма распределения Мохо для кратона Зимбабве, построенная на основе карты Мохо на сетке с шагом в полградуса. Мохо для кратона Зимбабве меняется с 35 до 51 км [Youssof et al., 2013]. Среднее значение Мохо для этого кратона составляет 39 км, а стандартное отклонение 3.3 км. Мощность осадков варьирует от 0 до 1000 м (среднее 200 м), тогда как рельеф меняется от 800 до 1300 м. Литосфера имеет мощность 200—250 км. Часто кратоны Каапвааль и Зимбабве объединяют в кратон Калахари. Для кратонов Зимбабве и Каапвааль западная часть более молодая, а восточная более древняя.

**Кратон Конго:** возраст 3.4—2.5 млрд лет, площадь около 4 млн км<sup>2</sup> [Begg et al., 2009; Wingate et al., 2010]. Кратон Конго находится в Центральной Африке, является одним из самых больших архейских кратонов на Земле и плохо изучен. По его краям находятся архейские щиты, тогда как в центре расположен обширный осадочный бассейн с более молодыми породами (аналогично Западно-Африканскому кратону). В настоящее время обсуждается вопрос о том, что под центром кратона Конго находятся более молодые породы и, таким образом, щиты на границах представляют собой малые куски архейской коры. Архейские породы представлены четырьмя щитами по краям кратона Конго. Эти блоки имеют различную геологическую историю, но их границы точно не определены в силу малой изученности Экваториальной Африки. Щит Габон-Камерун составляет северо-западную часть кратона, он содержит мигматиты, гнейсы и зеленокаменные пояса с возрастом 3.2—3.0 млрд лет. Щит Бому-Кибалиан составляет северо-восточную часть кратона и содержит тоналитовые гнейсы с возрастом 3.4 млрд лет, зеленокаменные пояса с возрастом 3.0—2.6 млрд лет, а также огнейсованные граниты с возрастом 2.51—2.46 млрд лет. Щит Касай находится в юго-восточной части кратона и содержит неоднородные гранулиты возрастом около 3 млрд лет, испытавшие метаморфизм на рубеже 2.9—2.6 млрд лет. Ангольский щит, расположенный в юго-западной части кратона Конго, состоит из гнейсов и габбро-чарнокитового комплекса.

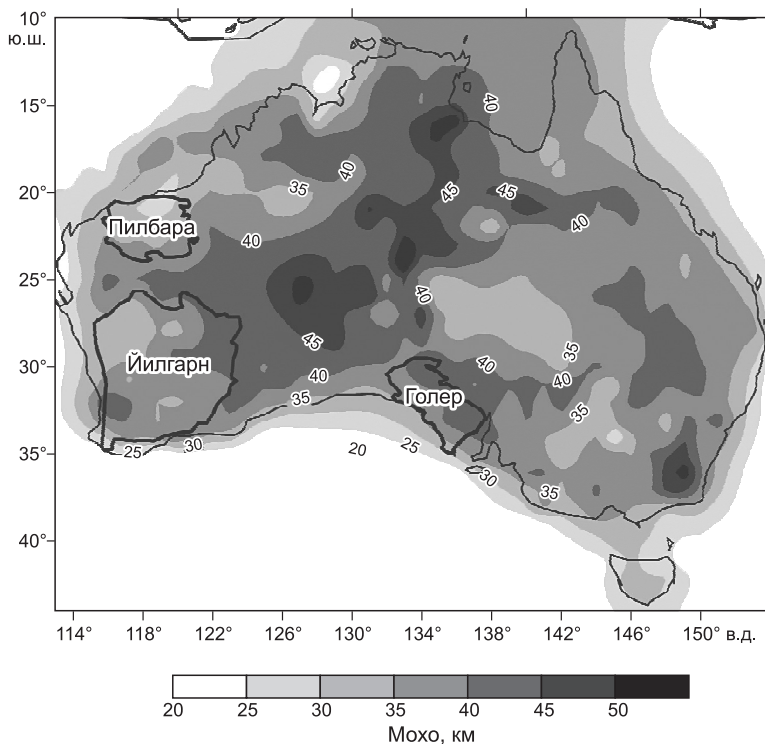
Глубина до границы Мохо кратона Конго меняется в диапазоне 37—46 км [Hansen et al., 2009; Tokam et al., 2010]. Наибольшая глубина до границы Мохо наблюдается для осадочного бассейна (мощность осадков до 7 км) в центре кратона (42—46 км). В то же время щиты на окраинах кратона имеют меньшую глубину до границы Мохо. Среднее значение глубины до границы Мохо для кратона Конго составляет 42 км (отклонение 1.9 км). Рельеф кратона меняется от 0 до 1700 м, а мощность литосферы составляет 200—250 км [Crosby et al., 2010].

## АВСТРАЛИЙСКИЕ КРАТОНЫ

Австралия имеет долгую и сложную тектоническую историю с архея до последней аккреции в раннем палеозое на востоке [Cawood, Korsch, 2008]. Австралия — самый маленький континент, который, несмотря на свои малые размеры, содержит три архейских блока земной коры: кратон Пилбара (0.18 млн км<sup>2</sup>), Йилгарн (0.6 млн км<sup>2</sup>) и Голер (0.16 млн км<sup>2</sup>). Суммарная площадь кратонов 0.94 млн км<sup>2</sup>. Эти кратоны маркируют юго-западную стабильную часть Австралии. В ней кратоны Пилбара, Йилгарн и Голер имеют среднее Мохо 33, 37 и 40 км соответственно. Мощность осадков в основном незначительна, тогда как рельеф меняется от 200 до 800 м. Мощность континентальной литосферы меняется от 200 км для Голер кратона до 250 км для кратонов Пилбара и Йилгарн [Gaherty et al., 1999]. Часть кратона Пилбара покрыта архейскими осадками (бассейн Хаммерсли).

На рис. 3 показана карта глубин до Мохо для Австралии на основе новой модели коры AuSRem [Salmon et al., 2013] с более детальным разрешением на сетке 0.5×0.5°. На ее фоне черной линией выделены и подписаны три австралийских кратона по работе [Clitheroe et al., 2001]. Границы австралийских кратонов взяты и оцифрованы авторами из работы [Salmon et al., 2013]. Большая часть Австралии, в отличие от стабильной части с блоками Пилбара, Йилгарн и Голер, характеризуется максимальной изменчивостью глубины Мохо от 30 до 55 км (см. рис. 3).

**Кратон Пилбара** в Западной Австралии имеет возраст 3.6—2.7 млрд лет и относительно небольшой размер (0.18 млн км<sup>2</sup>). Он достаточно хорошо изучен. Северная его часть лежит на побережье, в то



**Рис. 3. Австралийские кратоны на карте Мохо.**

Границы обозначены жирной черной линией на фоне карты Мохо.

время как на юге он отделен от другого кратона Йилгарн орогеном Каприкорн протерозойского возраста. Кратон Пилбара состоит из следующих частей [Reading, Kennett, 2003; Hickman, Kranendonk, 2008]:

1. Редкие выходы раннеархейской коры (3.6—3.5 млрд лет) с цирконами возраста до 3.8 млрд лет.

2. Восточный террейн Пилбара с возрастом пород от 3.5 до 3.1 млрд лет, который, в свою очередь, состоит из четырех различных групп пород.

3. Западный террейн Пилбара с возрастом пород 3.27—3.06 млрд лет состоит из трех различных гранит-зеленокаменных структур. На границе западного и восточного террейнов

Пилбара лежат холмы Элизабет (3.07 млрд лет), которые образовались при коллизии этих террейнов в единый блок архейской коры.

4. Террейн Куррана на юго-востоке кратона имеет возраст пород 3.2—2.85 млрд лет и состоит из двух основных гранитных комплексов.

5. Неоархейский бассейн Хаммерсли в южной части кратона. Этот бассейн является одним из древнейших осадочных бассейнов на Земле.

Глубина до границы Мохо для кратона Пилбара варьирует от 28 до 38 км [Reading, Kennett, 2003]. Для северной части кратона Мохо составляет 28—32 км, тогда как для южной части Мохо увеличивается до 34—38 км. Среднее Мохо для кратона Пилбара составляет всего 33 км (отклонение 2.7 км). Мощность осадков меняется от 0 до 450 м. Мощность литосферы составляет 200—250 км. Рельеф меняется от 100 до 600 м.

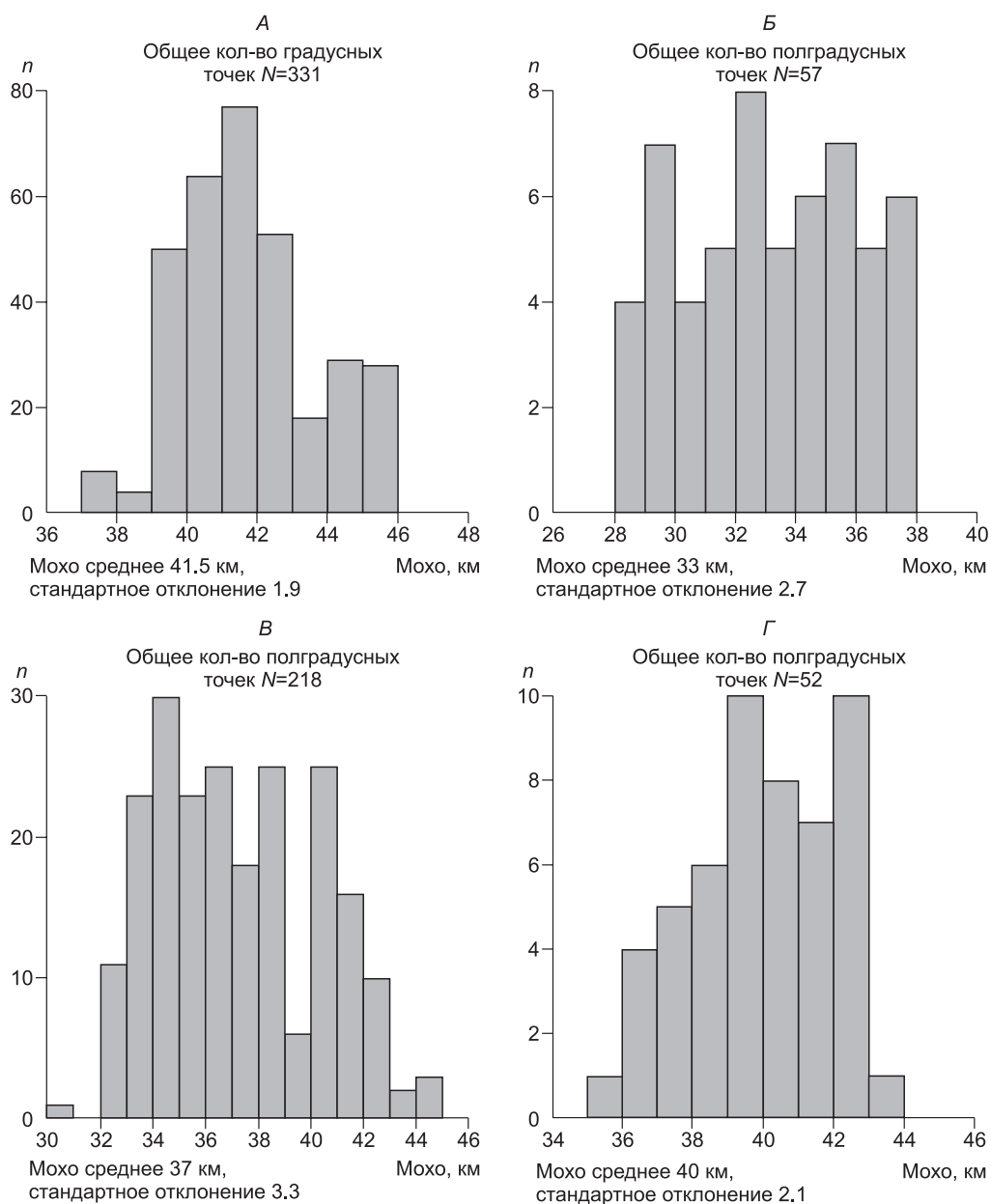
На рис. 4, Б показана диаграмма распределения глубины до границы Мохо для кратона Пилбара от 28 до 38 км, построенная на основе карты Мохо на сетке с шагом в полградуса.

**Кратон Йилгарн** также находится в Западной Австралии, составляя ее большую часть (0.6 млн км<sup>2</sup>). Возраст пород кратона Йилгарн составляет 3.7—2.6 млрд лет. Породы кратона содержат детритовые цирконы с возрастом больше 3.85 млрд лет, максимальное значение которого на сегодняшний день определено в 4.4 млрд лет [Wilde et al., 2001]. Кратоны Пилбара и Йилгарн разделены орогеном Каприкорн. Коллизия кратона Пилбара с кратоном Йилгарн и формирование орогена Каприкорн произошло в палеопротерозое. Образование кратона Йилгарн путем аккреции различных блоков древней коры произошло в интервале 2.94—2.63 млрд лет. Южная и юго-западная части кратона состоят в основном из гранитов и гнейсов, а на востоке преобладают зеленокаменные пояса [Reading et al., 2003]. Кратон Йилгарн состоит из следующих частей [Myers, 1993, 1997; Myers, Hocking, 1998]:

1. Западный гнейсовый террейн является самой древней частью кратона Йилгарн и представляет собой серию раннеархейских метаморфических поясов, сложенных преимущественно из гранулитовых гнейсов, которые являются одними из самых древних фрагментов коры на Земле [Wilde et al., 2001]. Западный гнейсовый террейн обнажается в западной части северной окраины кратона Йилгарн, тогда как на западе кратон в основном покрыт фанерозойскими осадками.

2. Провинция Мэрчисон состоит из двух зеленокаменных поясов и четырех комплексов гранитоидов. Ее породы выходят на поверхность на западе и севере кратона.

3. Провинция Южный Крест занимает центральную часть кратона Йилгарн и состоит из двух основных частей. Зеленокаменный пояс Марда-Дьемал имеет трехслойное строение с возрастом пород 2.73—3 млрд лет. Ороген Южный Крест протянулся с запада на восток по центральной части кратона. Он произошел в результате аккреции различных частей кратона около 2.73—2.68 млрд л. н.



**Рис. 4.** Диаграмма распределения глубин Мохо для четырех кратонов: Конго (А), Пилбара (Б), Йилгарн (В) и Голер (Г).

4. Восточная золотоносная провинция состоит из коматититсодержащих поясов. Архейский зеленокаменный пояс Уилуна содержит большую часть всех австралийских золотых запасов. Месторождения золота в основном расположены в архейской зоне сдвига Боулдер-Лефрой.

Глубина до границы Мохо для кратона Йилгарн меняется от 30 до 45 км с резким скачком сейсмических скоростей при переходе к мантии, так же как и у кратона Пилбара, причем для орогена Каприкорн между ними скачок скоростей на границе Мохо более смазан [Reading et al., 2003]. Глубина до границы Мохо в юго-западной части кратона Йилгарн резко возрастает от берега на северо-восток (32—44 км). Эта часть кратона сформирована преимущественно из гранитов и гнейсов. На крайнем юге кратона имеется локальная область с глубиной до границы Мохо до 45 км. Для этой части кратона характерны граниты и зеленокаменные пояса. В самой древней северо-западной части кратона глубина до границы Мохо находится в диапазоне 30—36 км. Для центральной и восточной частей кратона она составляет 34—38 и 38—40 км соответственно. Средняя глубина до границы Мохо — 37 км (отклонение 3.3 км). Мощность осадков меняется от 0 до 3.5 км, тогда как мощность литосферы составляет около 250 км. Рельеф меняется от 200 до 500 м.



На рис. 4, В показана диаграмма распределения Мохо для кратона Йилгарн от 32 до 46 км, построенная на основе карты Мохо Австралии на сетке с шагом в полградуса.

**Кратон Голер** находится в Южной Австралии. Небольшой по площади (0.16 млн км<sup>2</sup>), он имеет сложное внутреннее строение и относительно плохо изучен. Кратон состоит из различных образом деформированных и метаморфизованных осадочных, вулканических и плутонических пород [Fraser et al., 2010]. Значительная его часть покрыта более молодыми осадками, что затрудняет его изучение. Возраст пород кратона составляет 3.15—2.50 млрд лет. Наиболее древней частью является восточная часть, преимущественно состоящая из гранитов с возрастом 3.1—3.0 млрд лет. Глубина до границы Мохо меняется от 35 в юго-западной части до 44 км в восточной части кратона. Среднее Мохо около 40 км (отклонение 2.1 км). Мощность осадков варьирует от 0 до 450 м, тогда как мощность литосферы около 200 км. Рельеф меняется от 50 до 200 м.

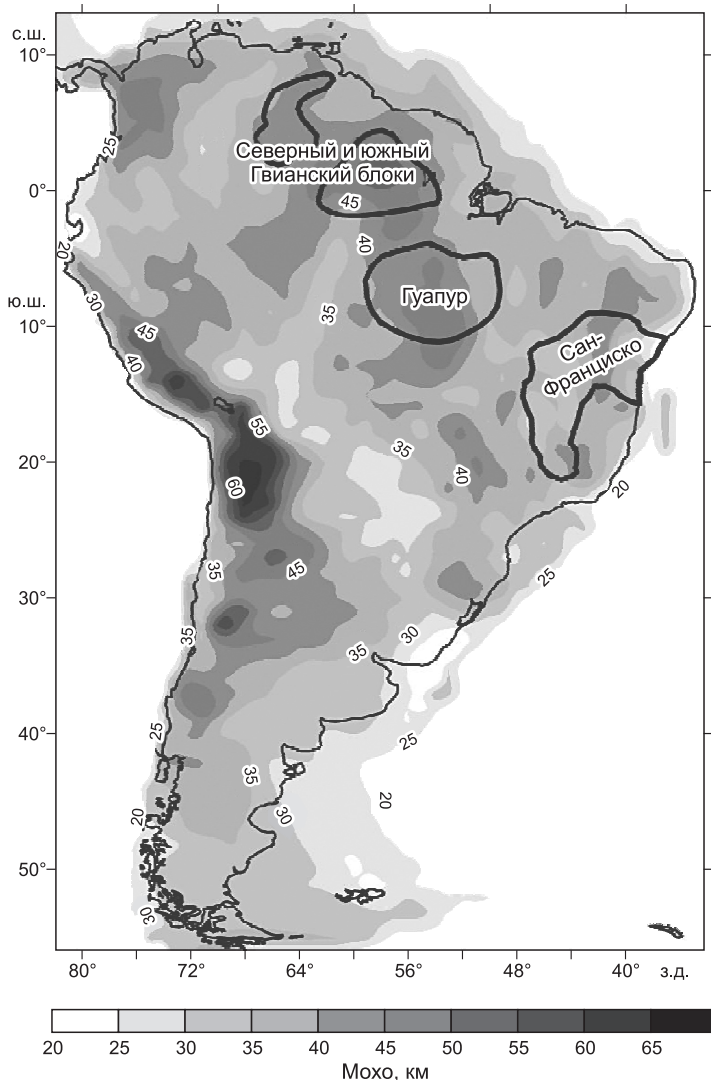
На рис. 4, Г показана диаграмма распределения Мохо для кратона Голер от 35 до 44 км, построенная на основе карты Мохо Австралии на сетке с шагом в полградуса.

### КРАТОНЫ ЮЖНОЙ АМЕРИКИ

Южная Америка состоит из трех основных геологических доменов [Beurlen, 1970]. Это — Тихоокеанское побережье с горной системой Анд; широкая равнинная область на восток от Анд, которая простирается от Аргентины до Восточной Колумбии; докембрийская область восточной части континента. На топографической карте эти три области также легко прослеживаются. Анды — крупный ороген с высотами свыше 6 км, который продолжает активно развиваться с начала мезозоя. Внутренние районы континента имеют плоский рельеф, в то время как рельеф докембрийской восточной части континента неровный. Южная Америка содержит два архейских кратона: Амазонский, состоящий из

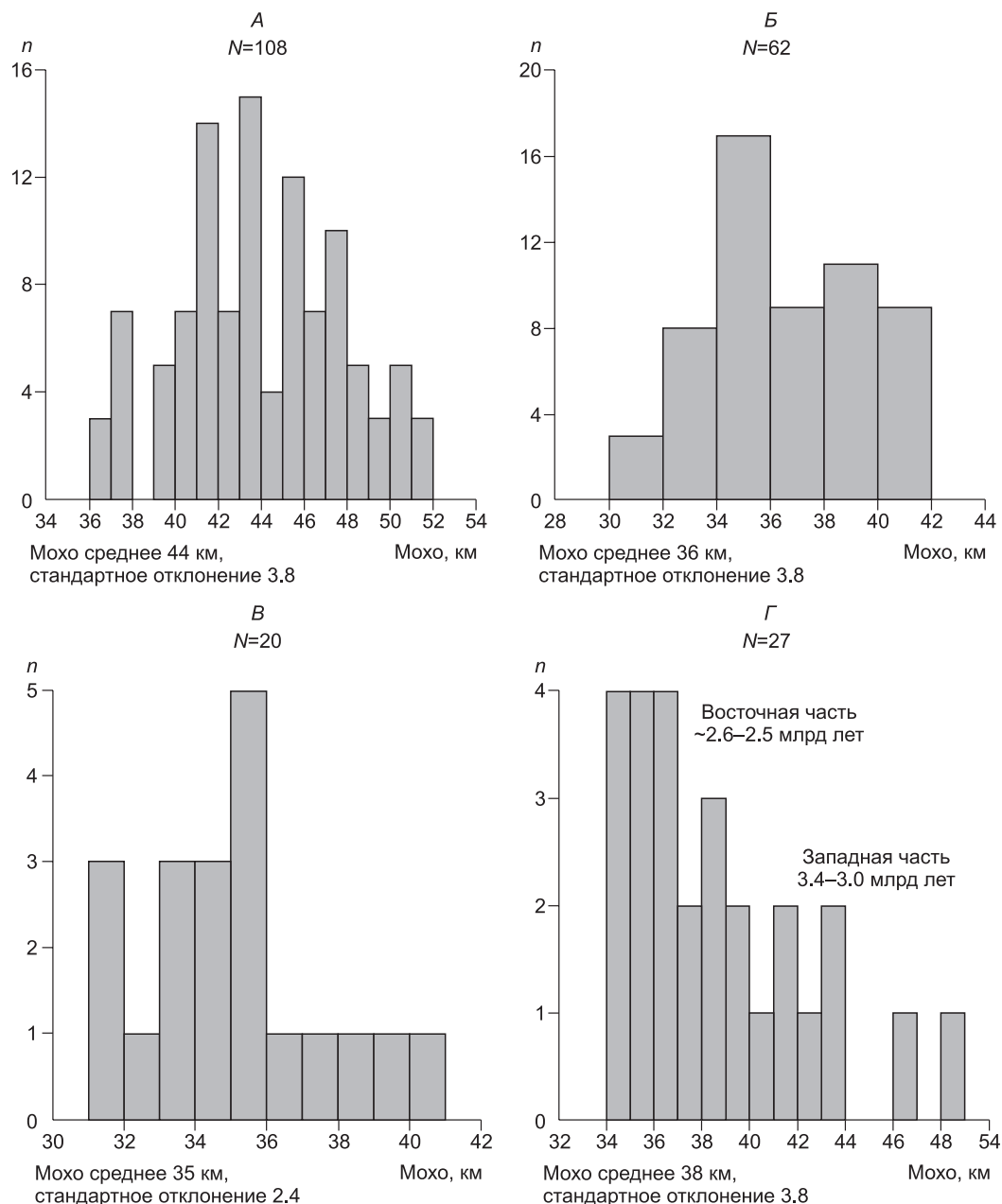
трех блоков, и Сан-Франциско. Суммарная площадь этих двух кратонов около 1.8 млн км<sup>2</sup>. На рис. 5 показана карта Мохо Южной Америки из работы [Lloyd et al., 2010], границы архейских кратонов Южной Америки взяты и оцифрованы из работы [Chulick et al., 2013].

**Амазонский кратон** — третий по величине среди кратонов южных материков с площадью около 1.2 млн км<sup>2</sup>. Он состоит из трех архейских щитов: Гуапур, Северного и Южного Гвианского щитов и плохо изучен. Между Южным Гвианским щитом и щитом Гуапур лежит Амазонский бассейн мезопротерозойского возраста. Возраст пород кратона составляет 3.2—2.6 млрд лет. Архейская кора представлена блоками Карайя и Южной Амапа в Бразилии и севернее (в Венесуэле) блоком Иматака. Преимущественно они состоят из гранит-зеленокаменных террейнов [Santos et al., 2000]. Провинция Карайя расположена в Бразилии южнее дельты Амазонки и сформирована из нескольких зеленокаменных поясов, простирающихся с запада на восток. Геохронологические данные показывают два основных возраста пород блока Карайя 3000—3014 и 2960—2980 млн лет [Pidgeon et al., 2000]. Также присут-



**Рис. 5. Кратоны Южной Америки на карте Мохо.**

Границы обозначены жирной черной линией.



**Рис. 6. Диаграмма распределения глубин Мохо для четырех кратонов: Амазонского (А), Сан-Франциско (Б), Грюнегона (В) и Дарвар (Г).**

N — общее количество градусных точек.

ствуют более поздние интрузивные гранитоиды с возрастом 2870—2880 млн лет. Продолжением блока Карая на юго-запад являются архейские породы блока Амапа. Архейский пояс Иматака входит в южную часть Гвианского щита между нижним течением Амазонки и Ориноко. Он состоит преимущественно из ортогнейсов и амфиболитов. Породы этого пояса образовались в результате двух масштабных событий с возрастом 3230—2930 и 2820—2600 млн лет [Teixeira et al., 1999].

Глубина до границы Мохо Амазонского кратона имеет большие вариации от 36 до 52 км. Для центральной части южного блока Гвианского щита она составляет 50 км и более. От центральной части глубина плавно убывает к краю щита на северо-запад до 46—48 км и более резко на восток (44 км) и юго-запад (40 км). Глубокое Мохо до 48 км характерно также для центральной и южной частей щита Гуапур. Однако для восточной части щита Гуапур глубина до границы Мохо резко падает до 36—38 км, а в западной она уменьшается менее резко до 40—42 км. Для северной части Гвианского щита глубина

до границы Мохо существенно меньше и однороднее (40—42 км). Гуапурский блок имеет среднюю глубину до границы Мохо 43 км, тогда как Гвианский 45 км. На рис. 6, А показана диаграмма распределения глубины до границы Мохо для Амазонского кратона с двумя главными интервалами 36—44 и 44—52 км, средняя глубина максимальна среди кратонов южных материков и составляет 44 км (отклонение 3.8 км) [Assumpção et al., 2013]. Мощность осадков от 0 до 500 м. Мощность литосферы 150—200 км. Рельеф меняется от 0 до 1000 м.

**Кратон Сан-Франциско** находится в восточной части континента и имеет площадь около 0.7 млн км<sup>2</sup>. До раскрытия Атлантики он являлся продолжением кратона Конго в Южной Америке [de Brito Neves, Fuck, 2014]. Северная часть кратона состоит из двух блоков Гавиао и Джекуе с различной историей. Блок Гавиао сформирован из наиболее древних пород в Южной Америке и содержит раннеархейские ТТГ породы и зеленокаменные пояса (3.4—3.0 млрд лет). Блок Джекуе в основном содержит чарнокиты и эндербиты (2.9—2.6 млрд лет). Южная часть кратона сложена из мигматитовых гнейсов и зеленокаменных поясов (до 3.4 млрд лет) с интрузиями гранитоидов и мафических пород (2.8—2.6 млрд лет). Значительная часть кратона покрыта протерозойскими осадками. Глубина до границы Мохо имеет существенные вариации (30—42 км). Сначала она возрастает с востока с 30 до 40—42 км в центре, а затем убывает на запад до 30—32 км. Южнее глубина возрастает до 34—36 км, а на южной границе кратона и до 38—40 км. На рис. 6, Б показана диаграмма распределения глубины до границы Мохо для кратона Сан-Франциско от 30 до 42 км, средняя глубина составляет 36 км (отклонение 3.8 км). Мощность осадков от 0 до 2.4 км. Мощность литосферы около 200 км. Рельеф меняется от 0 до 1000 м.

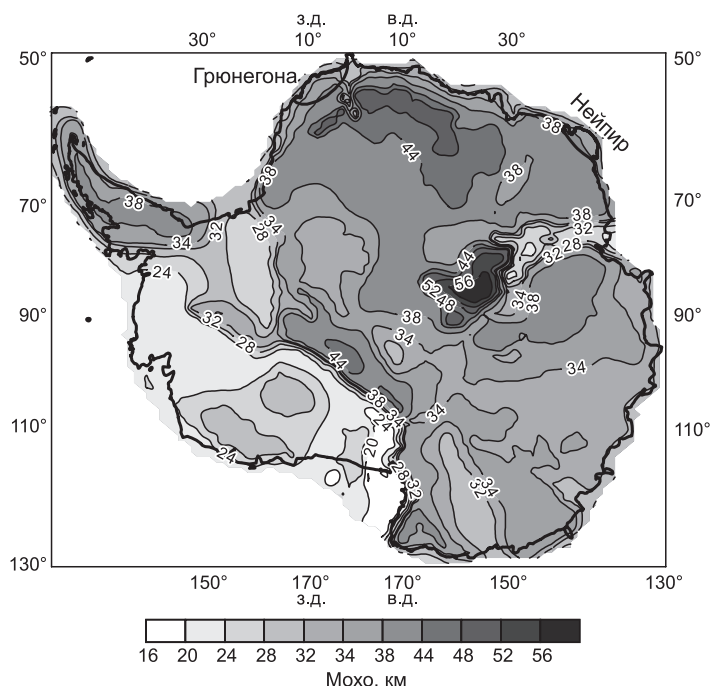
### КРАТОНЫ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

Тектонические блоки Западной Антарктиды по различным данным имеют возраст не старше палеозоя, тогда как Трансантарктические горы имеют предположительно протерозойский возраст [Mikhalsky, 2008]. Восточная Антарктида является наиболее древней частью континента и состоит, вероятно, в основном из протерозойских пород. В настоящее время в Восточной Антарктиде известны два архейских блока земной коры — кратоны Грюнегона (Grunehogna) и Нейпир (Napier). Но под слоем льда могут быть и другие неизвестные области архейской коры — например, на побережье в области бывшей границы с Южной Австралией (кратон Голер). Суммарная площадь известных антарктических кратонов составляет около 0.14 млн км<sup>2</sup>.

На рис. 7 показана карта глубин до границы Мохо для Антарктиды на основе модели AntMoho [Baranov, Morelli, 2013]. Черной линией выделены границы кратонов Нейпир [Kanao et al., 2011] и Грюнегона [Bayer et al., 2009]. Большая часть Антарктиды характеризуется (см. рис. 7) высокой изменчивостью границы Мохо от 16 до 56 км [Baranov, Morelli, 2013].

**Кратон Грюнегона** находится в атлантическом секторе Восточной Антарктиды в западной части Земли Королевы Мод (см. рис. 7). Площадь его относительно небольшая — 0.09 млн км<sup>2</sup>. Палеореко-

струкции показывают, что он формировался как часть кратона Каапвааль и оставался с ним единым целым до распада Гондваны в юрском периоде [Jacobs et al., 2008]. Коренные породы кратона обнажены на небольшом участке вдоль побережья, а в основном он покрыт льдом. Возраст пород кратона оценивается в 3.0—3.1 млрд лет, при этом отдельные части имеют возраст до 3.4 млрд лет [Marschall et al., 2010]. Глубина до границы Мохо плавно возрастает с 31—34 км на побережье до 38—41 км на южной границе кратона. Мощность осадков составляет от 100 до 700 м при рельефе поверхности от 100 до 1500 м. Подледный рельеф в основном отрицательный. Мощность литосферы под кратоном точно неиз-



**Рис. 7. Кратоны Нейпир и Грюнегона на карте Мохо для Антарктиды.**

Границы кратонов обозначены черной линией.

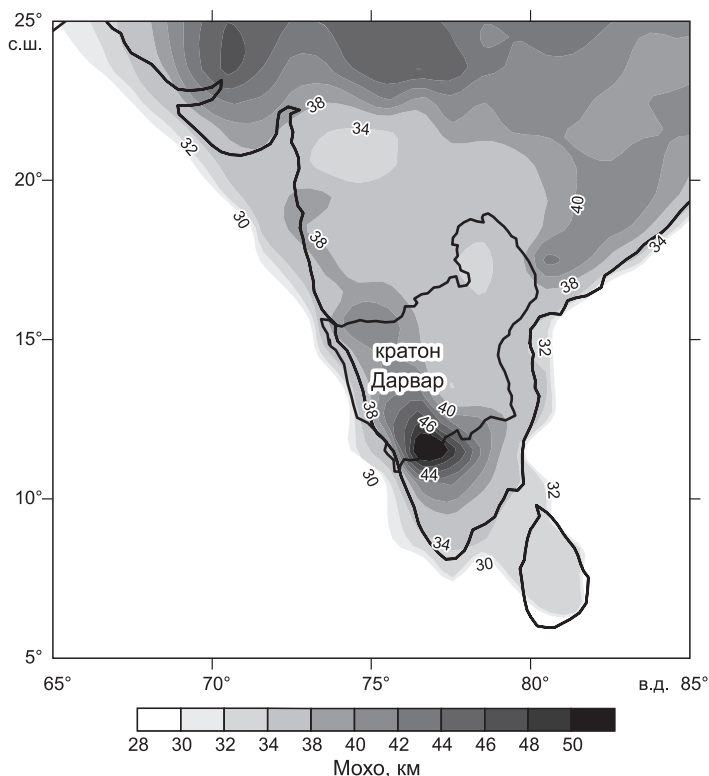
**Рис. 8. Кратон Дарвар на карте Мохо Индии из модели AsCrust [Baranov, 2010].**

Граница кратона обозначена черной линией.

вестна. На рис. 6, В показана диаграмма распределения Мохо для кратона Грюнегона от 31 до 41 км. Средняя глубина до границы Мохо для кратона Грюнегона около 35 км со средним отклонением в 2.4 км.

**Кратон Нейпир** находится в Восточной Антарктиде в западной части Земли Эндерби. По площади это самый маленький кратон из рассматриваемых — всего около 0.05 млн км<sup>2</sup>. По данным палеореконокструкций, кратон Нейпир до распада Гондваны имел общие границы с кратоном Дарвар в Южной Индии [Ishikawa, Kanao, 2002]. Древнейшие породы кратона Нейпир имеют возраст 3.8—4.0 млрд лет [Mikhalsky, 2008]. Данные сейсмической томографии показывают, что мощность континентальной литосферы под кратоном Нейпир достигает 250 км [Kanao et al., 2011]. Осадки отсутствуют, тогда как рельеф поверхности составляет от 600 до 1500 м. Подледный рельеф также положительный — до 800 м.

Этот архейский блок коры отделен от остальной части континента отрицательной подледной депрессией. Средняя глубина до границы Мохо 40 км с отклонением в 0.3 км (т. е. Мохо практически однородно).



### КРАТОН ДАРВАР ИНДИЙСКОГО СУБКОНТИНЕНТА

Индия во времена суперконтинента Пангея изначально находилась в Южном полушарии в составе Гондваны и граничила с Антарктидой, Африкой, Мадагаскаром и Австралией.

На рис. 8 показана карта Мохо Индии из модели AsCrust [Baranov, 2010]. Черной линией выделены границы кратона Дарвар по работе [Gupta et al., 2003].

В составе Индийского субконтинента кратон Дарвар имеет площадь 0.2 млн км<sup>2</sup> и возраст пород в интервале 3.4—2.5 млрд лет. Он характеризуется локальным утолщением коры до 49 км и утолщенным высокоскоростным слоем нижней коры, достигающим 20 км. Кратон Дарвар делят на две части: западную с возрастом 3.4—3.0 млрд лет и площадью 0.09 млн км<sup>2</sup> и восточную часть с возрастом около 2.5 млрд лет и площадью 0.12 млн км<sup>2</sup> [Gupta et al., 2003]. Глубина до Мохо для кратона Дарвар меняется от 34 до 49 км. Средняя глубина до Мохо 38 км, а стандартное отклонение 3.8 км [Rai et al., 2003]. Раннесреднеархейская (3.4—3.0 млрд лет) западная часть кратона Дарвар, нетронутая протерозойскими преобразованиями, имеет мощность коры 42—49 км, тогда как позднеархейская (около 2.5 млрд лет) восточная часть 34—40 км, что соответствует мощности стандартной архейской коры. Предполагается, что западная часть кратона Дарвар 3.0 млрд л. н. имела глубину до границы Мохо около 60—80 км [Gupta et al., 2003]. Одно из объяснений этого — субдукция древней океанической плиты под кратон. В настоящее время почти везде осадки отсутствуют, тогда как рельеф меняется от 200 до 800 м.

Мощность литосферы под кратоном Дарвар, по данным [Kumar et al., 2007], аномально мала и составляет всего около 100 км. На рис. 6, Г показана диаграмма распределения Мохо для кратона Дарвар от 34 до 44 км с отклонениями до 49 км.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе рассмотрено строение коры архейских кратонов материков, ранее входивших в Гондвану. Были собраны данные по площади, возрасту, составу, глубине до Мохо, мощности осадков и поверхностному рельефу для каждого кратона, а также мощности литосферы. Общие данные по кратонам показаны в таблице. Приведем анализ полученных данных.

Площадь кратонов меняется от 0.05 млн км<sup>2</sup> (кратон Нейпир в восточной Антарктиде) до 4 млн км<sup>2</sup> (кратон Конго в Центральной Африке). Выделяются Западно-Африканский (2.9 млн км<sup>2</sup>) и Конго крато-

ны (4 млн км<sup>2</sup>) с огромной площадью и осадочными бассейнами внутри. Возможно, они не представляют собой единого целого. Остальные кратоны существенно меньше. Возраст пород кратонов меняется в диапазоне 3.8—2.5 млрд лет, причем один и тот же кратон может содержать породы разного возраста. Самые древние имеют возраст 3.6—3.8 млрд лет (ранний архей), тогда как верхняя граница совпадает с границей между поздним археем и протерозоем (2.5 млрд лет).

Рельеф кратонов меняется от 0 до 2 км (кратон Каапвааль), а мощность осадочного чехла варьирует от 0 до 7 км. Важно отметить, что в настоящей работе построены модели глубин до границы Мохо для кратонов более точные, чем глобальная модель Мохо для континентальной коры [Baranov, Morelli, 2014] и глобальная модель CRUST 1.0 [Laske et al., 2013]. Этот результат получен за счет большого количества использованных региональных сейсмических данных.

Глубина до границы Мохо в пределах кратонов меняется в широком диапазоне от 28 до 52 км, а средняя глубина от 33 (кратон Пилбара) до 44 км (Амазонский кратон). Кратон Пилбара имеет самую малую глубину до границы Мохо — 28—38 км.

Стандартная континентальная кора имеет значение Мохо 38—44 км [Christensen, Mooney, 1995]. Таким образом, кратоны южных континентов по этому признаку можно разделить на две группы: кратоны со средним значением глубины Мохо, меньшим 38 км (Пилбара, Грюнегона, Сан-Франциско, Йилгарн), и кратоны со значением глубины до Мохо, попадающей в интервал стандартной континентальной коры (все остальные — в пределах 38—44 км).

Данный результат ставит под сомнение один из главных выводов глобальной обзорной работы по архейской коре [Durrheim, Mooney, 1991] о том, что мощность архейской коры находится в диапазоне 27—40 км со средним значением около 35 км. Как показано выше, согласно последним данным кратоны Каапвааль, Зимбабве, Амазонский и Дарвар имеют мощность архейской коры, достигающую 48—52 км, но значительная часть кратонов действительно имеет мощность 32—40 км (см. рис. 2, 4, 6).

Данные, проанализированные в настоящей статье, показывают, что участки недеформированной ранне- и среднеархейской коры, сохранившейся до наших дней, имеют неглубокое Мохо (28—38 км). Причина этого, по-видимому, в ином режиме выплавления силикатной коры из архейской мантии. Возможно, циркуляция вещества мантии в раннем архее была иная, например, отсутствовала тектоника плит и континентальная кора выплавлялась из единого магматического океана. Другой причиной может быть деламинация нижней коры. Исключением является кратон Западный Дарвар. По различным данным, кора кратона Западный Дарвар могла быть аномально утолщена из-за древней субдукции под этот архейский блок.

Один из выводов более новой обзорной работы по архейским кратонам [Abbott et al., 2013] состоит в том, что большая часть архейской коры имеет относительно плоскую поверхность Мохо. Результаты же настоящей работы не согласуются с этим выводом. Диаграммы распределения глубины до Мохо показывают большую вариабельность Мохо для каждого кратона (см. таблицу). Особенно сильные вариации глубины до Мохо наблюдаются для кратонов Каапвааль (34—49 км), Зимбабве (34—50 км), Йилгарн (30—44 км), Амазонский (36—52 км), Сан-Франциско (30—42 км), Дарвар (34—50 км), при

Общие данные по кратонам

Кратон	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Возраст, млрд лет	Глубина границы Мохо, км	Средняя глубина Мохо, км	Осадки, км	Средняя толщина осадков, км	Рельеф, км	Средняя высота рельефа, км	Толщина литосферы, км
Каапвааль	550	3.7—2.6	34—49	40	0—2.7	0.5	0—2	1.2	200—250
Зимбабве	240	3.7—2.6	35—51	39	0—1	0.2	0.8—1.3	1	200—250
Танзанийский	390	2.9—2.5	36—44	39	0—0.2	0.1	1.1—1.8	1.3	150
Конго	4 000	3.4—2.5	37—46	42	0—7	1.3	0—1.7	0.7	200—250
Западно-Африканский	2 900	3.5—2.7	37—43	40	0—7	1.4	0—0.8	0.3	200—250
Дарвар	210	3.4—2.5	34—49	38	0—0.3	0.02	0.19—0.79	0.49	?
Йилгарн	600	3.7—2.6	30—45	37	0—3.6	0.27	0.2—0.5	0.4	250
Пилбара	180	3.6—2.7	28—38	33	0—0.45	0.13	0.11—0.57	0.35	250
Голер	160	3.1—2.5	35—44	40	0—0.45	0.14	0.04—0.18	0.13	200
Сан-Франциско	720	3.4—2.6	30—42	36	0—2.4	0.34	0—1	0.56	200
Гуапур	620	3.0—2.8	36—48	43	0—0.45	0.16	0.1—0.43	0.28	150—200
Гвиана	630	3.2—2.6	40—52	45	0—0.5	0.1	0.04—1	0.32	150—200
комплекс Нейпир	50	3.8—2.5	40	40	0	0	0.6—1.5	1	~250
Грюнегона	90	3.4—3.0	31—41	35	0.13—0.72	0.35	0.13—1.47	0.76	~150

этом во многих случаях видны двухмодальные распределения 34—42 км (30—44 км) и более 42—44 км (см. рис. 2, А, Б; 4, А, Б; 6, А). Остальные также имеют неоднородное Мохо, но его вариации меньше. При этом, согласно [Abbott et al., 2013], диапазон средних глубин до границы Мохо для разных кратонов составляет от 32 до 39 км, тогда как для более поздней коры среднее Мохо составляет 41 км, что не совпадает со средними значениями Мохо (33—44 км) из настоящей работы. Нижняя граница среднего значения Мохо для кратонов [Abbott et al., 2013] и в нашей работе практически совпадает, а верхняя граница отличается существенно. Среднее Мохо для двух архейских кратонов (Конго и Амазонский кратоны) заходит в диапазон для постархейской коры из [Abbott et al., 2013].

Отметим также, что в работу [Abbott et al., 2013] не включен целый ряд кратонов, проанализированных в настоящей работе, а именно: два крупнейших африканских кратона: Западно-Африканский и Конго, кратон Голер в Австралии, совсем не включены южно-американские и антарктические кратоны. Фактически из 13 кратонов южных материков в работе [Abbott et al., 2013] проанализировано лишь шесть из них — Каапвааль, Зимбабве, Танзанийский, Пилбара, Йилгарн и Дарвар. Используемые нами новые фактические данные и привели к таким существенным отличиям.

Высокие вариации мощности кратонной коры связаны с их длительной и различающейся историей. Архейская кора за весьма длительное время своей эволюции могла претерпеть весьма существенные воздействия (находилась в разных геодинамических обстановках, испытывая в разное время сжатие, растяжение, деляминацию, интрузию магматических пород и др.). При этом континентальная кора не изменяется в течение миллиардов лет после образования. Утолщенная кора может сохраняться длительное время, тогда как рельеф на поверхности сглаживается за счет эрозии. Условно можно разделить кратоны на небольшие и большие по размерам (Конго, Западно-Африканский). Большие кратоны имеют мощные фанерозойские осадочные бассейны. Для небольших кратонов осадки в основном незначительны. Имеются осадочные бассейны архейского возраста.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Анализ имеющихся данных в настоящей статье позволил определить, что глубины до Мохо изменяются для архейских кратонов южных материков в диапазоне 28—52 км. При этом кора архейских кратонов более неоднородна по глубине до Мохо, чем считалось ранее.

2. Проведенное нами исследование показывает, что кора раннего и среднего архея отличается от более поздней. Участки недеформированной ранне- и среднеархейской коры имеют неглубокое Мохо 28—38 км, в то время как позднеархейская и деформированная кора имеет большее Мохо (до 52 км).

Отметим, что в работе рассматривались кратоны в их современном состоянии и в современных границах. В связи с неоднократно происходившими в процессе эволюции Земли суперконтинентальными циклами и возможным при этом разделением архейских блоков на части, число обособленных архейских блоков земной коры с каждым распадом суперконтинента должно было увеличиваться, а их размеры уменьшаться. На это, видимо, указывает и то, что большинство современных кратонов имеют выход на границу континентов.

Авторы выражают признательность анонимным рецензентам за ряд конструктивных замечаний. Отдельную благодарность авторы выражают академику Н.Л. Добрецову, способствовавшему существенному улучшению рукописи.

Работа выполнена в рамках госзаказа и при поддержке грантов РФФИ 13-05-01123 а и 16-55-12033 ННИО\_а.

## ЛИТЕРАТУРА

**Abbott D.H., Mooney W.D., Van Tongeren J.A.** The character of the Moho and lower crust within Archean cratons and the tectonic implications // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 690—705.

**Assumpção M., Feng M., Tassara A., Julià J.** Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 82—96.

**Attok K., Ekwueme B.N.** The West African shields / Eds. de Wit M., L.D. Ashwal // *Greenstone belts*. Oxford, Clarendon Press, 1997, p. 515—527.

**Bagherbandi M., Sjöberg L.E.** Modelling the density contrast and depth of the Moho discontinuity by seismic and gravimetric–isostatic methods with an application to Africa // *J. African Earth Sci.*, 2012, v. 68, p. 111—120.

**Baranov A.A.** A new crustal model for Central and Southern Asia // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2010, v. 46, p. 34—46.

**Baranov A., Morelli A.** The Moho depth map of the Antarctica region // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 299—313.

- Baranov A., Morelli A.** The global Moho depth map for continental crust // *Geophys. Res. Abstr.*, 2014, v. 16, EGU2014-16384.
- Bayer B., Geissler W., Eckstaller A., Jokat W.** Seismic imaging of the crust beneath Dronning Maud Land, East Antarctica // *Geophys. J. Int.*, 2009, v. 178, p. 860—876.
- Begg G., Griffin W., Natapov L., O'Reilly S., Grand S., O'Neill C., Hronsky J., Poudjom Y., Swain D., Deen T., Bowden P.** The lithospheric architecture of Africa: Seismic tomography, mantle petrology, and tectonic evolution // *Geosphere*, 2009, v. 5, № 1, p. 23—50, doi:10.1130/GES00179.1.
- Beurlen K.** *Geologie von Brasilien.* Gebruder Borntraeger, Berlin, 1970, 444 p.
- Borg G., Shackelton R.M.** The Tanzania and NE-Zaire cratons / Eds. de Wit M., L.D. Ashwal // *Greenstone belts.* London, Clarendon Press, 1997, p. 608—619.
- de Brito Neves B.B., Fuck R.A.** The basement of the South American platform: Half Laurentian (N-NW)+half Gondwanan (E-SE) domains // *Precambrian Res.*, 2014, v. 244, p. 75—86.
- Cawood P., Korsch R.J.** Assembling Australia: Proterozoic building of a continent // *Precambrian Res.*, 2008, v.166, p. 1—35.
- Chesley J.T., Rudnick R.L., Lee C.T.** Re-Os systematics of mantle xenoliths from the East African Rift: Age, structure, and history of the Tanzanian craton // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, v. 63, p. 1203—1217, doi: 10.1016/S0016-7037(99)00004-6.
- Christensen N.I., Mooney W.D.** Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view // *J. Geophys. Res.*, 1995, v. 100, № B7, p. 9761—9788.
- Chulick G.S., Detweiler S., Mooney W.D.** Seismic structure of the crust and uppermost mantle of South America and surrounding oceanic basins // *J. South Am. Earth Sci.*, 2013, v. 42, p. 260—276.
- Clitheroe G., Gudmundsson O., Kennett B.L.N.** The crustal thickness of Australia // *J. Geophys. Res.*, 2001, v. 105, № B6, p. 13697—13713.
- Crosby A. G., Fishwick S., White N.** Structure and evolution of the intracratonic Congo Basin // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2010, v. 11, Q06010, doi:10.1029/2009GC003014.
- Dugda M.T., Nyblade A.A., Julia J., Langston C.A., Ammon C.J., Simiyu S.** Crustal structure in Ethiopia and Kenya from receiver function analysis: Implications for rift development in eastern Africa // *J. Geophys. Res.*, 2005, v.110, B01303. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JB003065>.
- Durrheim R.J., Mooney W.D.** Archean and Proterozoic crustal evolution: evidence from crustal seismology // *Geology*, 1991, v. 19, p. 606—609.
- Fraser G., McAvaney S., Neumann N., Szpunar M., Reid A.** Discovery of early Mesoarchean crust in the eastern Gawler Craton, South Australia // *Precambrian Res.*, 2010, v. 179, p. 1—21.
- Frei R., Blenkinsop T.G., Shunberg R.** Geochronology of the late Archean Razi and Chilimanzi suites of granites in Zimbabwe: Implications for the late Archean tectonics of the Limpopo belt and Zimbabwe craton // *South African J. Geol.*, 1999, v. 102, p. 55—63.
- Gaherty J. B., Mamoru K., Jordan T. H.** Seismological structure of the upper mantle: a regional comparison of seismic layering // *Phys. Earth Planet. Int.*, 1999, v. 110, p. 21—41.
- Gangopadhyay A., Pulliam J., Sen M. K.** Waveform modelling of teleseismic S, Sp,  $S_s^P_m^P$ , and shear-coupled PL waves for crust- and upper-mantle velocity structure beneath Africa // *Geophys. J. Int.*, 2007, v. 170, № 3, p. 1210—1226.
- Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Abe N., Aulbach S., Davies R.M., Pearson N.J., Doyle B.J., Kivi K.** The origin and evolution of Archean lithospheric mantle // *Precambrian Res.*, 2003, v. 127, p. 19—41.
- Gupta S., Rai S., Prakasam K., Srinagesh D., Chadha R., Priestley K., Gaur V.** First evidence for anomalous thick crust beneath mid-Archean western Dharwar craton // *Curr. Sci.*, 2003, v. 84, № 9, p. 1219—1226.
- Hansen S.E., Nyblade A.A., Julià J.** Estimates of crustal and lithospheric thickness in sub-Saharan Africa from S-wave receiver functions // *South African J. Geol.*, 2009, v. 112, p. 229—240.
- Hickman A.H., van Kranendonk M.J.** Archean crustal evolution and mineralization of the northern Pilbara Craton — a field guide. Geological Survey of Western Australia. Record, 2008, 79 p.
- Ishikawa M., Kanao M.** Structure and collision tectonics of Pan-African orogenic belt—scientific significance of the geotranssect for a supercontinent: Gondwanaland // *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 2002, v. 77, p. 287—302 (in Japanese, with English abstract).
- Jacobs J., Pisarevsky S., Thomas R.J., Becker T.** The Kalahari craton during the assembly and dispersal of Rodinia // *Precambrian Res.*, 2008, v. 160, p. 142—158.
- James D., Niu F., Rokosky J.** Crustal structure of the Kaapvaal Craton and its significance for early crustal evolution // *Lithos*, 2003, v. 71, p. 413—429.

**Julia J., Ammon C.J., Nyblade A.A.** Evidence for mafic lower crust in Tanzania, East Africa, from joint inversion of receiver functions and Rayleigh wave dispersion velocities // *Geophys. J. Int.*, 2005, v. 162, p. 555—569.

**Kanao M., Fujiwara A., Miyamachi H., Toda S., Tomura M., Ito K., Ikawa T.** Reflection imaging of the crust and the lithospheric mantle in the Lutzow–Holm Complex, Eastern Dronning Maud Land, Antarctica, derived from the SEAL Transects // *Tectonophysics*, 2011, v. 508, p. 73—84.

**Kroner A., Tegtmeier A.** Gneiss-greenstone relationships in the Archean Gneiss Complex of southwestern Swaziland, southern Africa and implications for early crustal evolution // *Precambrian Res.*, 1994, v. 67, p. 109—139, doi: 10.1016/0301-9268(94)90007-8.

**Kumar P., Yuan X., Kumar R., Kind R., Xueqing L., Chadha R.K.** The rapid drift of the Indian tectonic plate // *Nature*, 2007, v. 449, p. 894—897.

**Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M.** Update on CRUST 1.0 — A 1-degree global model of Earth's crust // *Geophys. Res. Abstracts*, 2013, v. 15, Abstract EGU2013-2658.

**Lloyd S., van der Lee S., Franca G.S., Assumpcao M., Feng M.** Moho map of South America from receiver functions and surface waves // *J. Geophys. Res.*, 2010, v. 115, B11315, doi:10.1029/2009JB006829.

**Manya S., Maboko M.A.H.** Dating basaltic volcanism in the Neoproterozoic Sukumaland greenstone belt of the Tanzania Craton using the Sm-Nd method: Implications for the geological evolution of the Tanzania Craton // *Precambrian Res.*, 2003, v. 121, p. 35—45, doi: 10.1016/S0301-9268(02)00195-X.

**Marschall H.R., Hawkesworth C.J., Storey C.D., Dhuime B., Leat P.T., Meyer H.-P., Tamm-Buckle S.** The Annandagstoppane Granite, East Antarctica: Evidence for Archean intracrustal recycling in the Kaapvaal-Grüneghna Craton from zircon O and Hf isotopes // *J. Petrol.*, 2010, v. 51, № 11, p. 2277—2301.

**Myers J.S.** Precambrian history of the West Australian craton and adjacent orogens // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1993, v. 21, p. 453—485.

**Myers J.S.** Preface: Archean geology of the Eastern Goldfields of Western Australia—regional overview // *Precambrian Res.*, 1997, v. 83, p. 1—10.

**Myers J.S., Hocking R.M.** Geological map of Western Australia, 1:2 500 000 (13th edition). Geological Survey of Western Australia, Perth, 1998.

**Mikhalsky E.V.** Sm–Nd crustal provinces in Antarctica // *Dokl. Earth Sci.*, 2008, v. 419A, № 3, p. 388—391.

**Moser D.E., Flowers R.M., Hart R.J.** Birth of the Kaapvaal tectosphere 3.08 billion years ago // *Science*, 2001, v. 291, p. 465—468.

**Pasyanos M.E., Nyblade A.A.** A top to bottom lithospheric study of Africa and Arabia // *Tectonophysics*, 2007, 444, p. 27—44.

**Pidgeon R.T., Macambira M.J.B., Lafon J.M.** Th-U-Pb systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajas Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of enderbite // *Chem. Geol.*, 2000, v. 166, p. 159—171.

**Potrel A., Peucat J., Fanning C.M., Auvray B., Burg J., Caruba C.** 3.5 Ga old terranes in the West African Craton, Mauritania // *Geol. Soc. London*, 1996, v. 153, p. 507—510, doi: 10.1144/gsjgs.153.4.0507.

**Rai S., Priestley K., Suryaprakasam K., Srinagesh D., Gaur V., Du Z.** Crustal shear velocity structure of the south Indian shield // *J. Geophys. Res.*, 2003, v. 108, № B2, 2088, doi:10.1029/2002JB001776.

**Reading A.M., Kennett B.L.N.** Lithospheric structure of the Pilbara Craton, Capricorn Orogen and northern Yilgarn Craton, Western Australia, from teleseismic receiver functions // *Aust. J. Earth Sci.*, 2003, v. 50, p. 439—445.

**Reading A.M., Kennett B.L.N., Dentith M.C.** Seismic structure of the Yilgarn Craton, Western Australia // *Aust. J. Earth Sci.*, 2003, v. 50, p. 427—438.

**Ritsema J., van Heijst H.** New seismic model of the upper mantle beneath Africa // *Geology*, 2000, v. 28, p. 63—66, doi: 10.1130/0091-7613.

**Salmon M., Kennett B.L.N., Stern T., Aitken A.R.A.** The Moho in Australia and New Zealand // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 288—298.

**Sandvol E., Seber D., Calvert A., Barazangi M.** Grid search modeling of receiver functions: implications for crustal structure in the Middle East and North Africa // *J. Geophys. Res.*, 1998, v. 103, № B11, p. 26.899—26.917.

**Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., McNaughton N. J., Fletcher I. R.** A new understanding of the provinces of the Amazon craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology // *Gondwana Res.*, 2000, v. 3, № 4, p. 453—488.



**Smith C.B., Pearson D.G., Bulanova G.P., Beard A.D., Carlson R.W. Wittig N., Sims K., Chimuka L., Muchemwa E.** Extremely depleted lithospheric mantle and diamonds beneath the southern Zimbabwe Craton // *Lithos*, 2009, v. 112, № 2, p. 1120—1132.

**Stankiewicz J., de Wit M.** 3.5 billion years of reshaped Moho, southern Africa // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 675—689.

**Tedla G.E., van der Meijde M., Nyblade A. A., van der Meer F. D.** A crustal thickness map of Africa derived from a global gravity field model using Euler deconvolution // *Geophys. J. Int.*, 2011, v. 187, p. 1—9, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05140.x

**Teixeira W., Tassinari C.C.G., Szabo G.J., Mondin M., Sato K., Santos A., Siso C.S.** Sm-Nd constrains on protolith age of the Archean Imataca Complex, Venezuela // *South American Symposium on Isotope Geology*, Cordoba, Argentina, 1999, v. 2, p. 136—138.

**Tokam A.-P.K., Tabod Ch.T., Nyblade A.A., Julià J., Wiens D.A., Pasyanos M.E.** Structure of the crust beneath Cameroon, West Africa, from the joint inversion of Rayleigh wave group velocities and receiver functions // *Geophys. J. Int.*, 2010, v. 183, p. 1061—1076, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04776.x

**Youssof M., Thybo H., Artemieva I., Levander A.** Moho depth and crustal composition in Southern Africa // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 267—287.

**Weeraratne D.S., Forsyth D.W., Fischer K.M., Nyblade A.A.** Evidence for an upper mantle plume beneath the Tanzanian craton from Rayleigh wave tomography // *J. Geophys. Res.*, 2003, v. 108, № B9, p. 2427, doi:10.1029/2002JB002273.

**Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., de Waele B.** Paleomagnetism of the 765 Ma Luakela volcanics in northwest Zambia and implications for Neoproterozoic positions of the Congo craton // *Amer. J. Sci.*, 2010, v. 310, p. 1333—1344, doi 10.2475/10.2010.05.

**Wilde S.A., Valley J.W., Peck W.H., Graham C.M.** Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago // *Nature*, 2001, v. 409, p. 175—178.

**Zeh A., Gerdes A., Barton J.M.** Archean accretion and crustal evolution of the Kalahari Craton — the zircon age and Hf isotope record of granitic rocks from Barberton/Swaziland to the Francistown Arc // *J. Petrol.*, 2009, v. 50, p. 933—966.

*Рекомендована к печати 30 марта 2017 г.  
Н.Л. Добрецовым*

*Поступила в редакцию  
15 января 2017 г.*