

## РАЗВИТИЕ ГЕОТЕКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЬЕФА ЗЕМЛИ

*В статье рассматривается история формирования и распада суперконтинентов на Земле. Раскрывается роль механизмов спрединга и субдукции в обновлении океанической земной коры, роль коллизии континентов в формировании горных структур. Показаны причины протерозойских оледенений, их роль в возникновении и развитии многоклеточной жизни. Описываются процессы формирования последнего суперконтинента Пангеи, его распада и формирования современного очертания материков. Приводятся гипотезы о формировании в будущем нового суперконтинента.*

Геотектура – крупнейшие мегаформы рельефа Земли планетарного масштаба. На современном геологическом этапе развития Земли выделяется 6 материков и 4–5 океанов. В основании материков лежат континентальный тип земной коры, в основании океанов (кроме Северного Ледовитого) – океанический. Молодая океаническая земная кора постоянно формируется в результате спрединга в зоне срединно-океанических хребтов, где также происходит интенсивный вынос растворимых элементов гидротермальными источниками из океанической коры в океаны. Утилизация океанической коры, состоящей преимущественно из базальтов, происходит в зонах субдукции, где она погружается в мантию, превращаясь в высокометаморфизированные породы – эклогиты, имеющие плотность большую, чем плотность наиболее распространённых пород мантии – перидотитов, – вследствие чего погружающиеся в недра мантии. На большой глубине (около 700 км) происходит расплавление и потеря механической жёсткости погружающегося участка коры. Таким образом, для океанической коры характерен постоянный спрединго-

субдукционный круговорот, обновляющий всю океаническую кору Земли в основном примерно за 100 млн. лет (самое древнее дно океана имеет возраст 156 млн. лет и образовалось в юрском периоде).

Некоторые участки океанической коры исключаются из этого круговорота, оставаясь в замкнутом изолированном виде, например, вследствие коллизии континентов (северная часть впадины Каспийского моря, сложенная океанической корой девонского возраста) или процессов обдукции, которые подняли океаническую кору на поверхность и привели к формированию офиолитовых комплексов (Новая Каледония, Оманский полуостров и т. д., самые древние офиолитовые комплексы архейского возраста обнаружены в Карелии, Вайоминге, Китае).

Континентальная кора, обладая значительно меньшей плотностью, не имеет аналога спредингового механизма утилизации, сближение континентальных плит приводит к коллизии континентов, приводящей к значительному увеличению мощности коры (до 70 км в районе Гималаев). Возникающие при этом горные структуры интенсивно разрушаются процессами поверхностной и тектонической эрозии, а в постколлизийную эпоху процессы сжатия сменяются процессами растяжения за счёт растекания нижней коры под действием сильного давления вышележащих слоёв. В результате описанных особенностей в целом континентальная кора значительно старше океанической, а около 7 % её старше 2,5 млрд. лет [1].

В развитии континентальной коры выделяют суперконтинентальные циклы – периодические объединения всей земной суши в один суперконтинент и последующее его разделение. Один такой цикл продолжается от 300 до 500 млн. лет. Объединение континентов обуславливает установление на большей части суши континентального климата, повышение вероятности формирования материковых оледенений и понижение уровня мирового океана, тогда как разделение материков существенно увеличивает долю суши с морским климатом и повышает уровень океана.

Описанные особенности континентальной и океанической коры важны для понимания процесса развития геотектур, связанного с движением литосферных плит, которое началось, как предполагается, ещё в архее, так как именно этим возрастом датируются кратоны – древние платформы с докембрийским фундаментом. Именно такие кратоны, как считается, составили основу первого гипотетического суперконтинента – Ваальбара (начало формирования 3,6 млрд. лет назад, время существования 3,1–2,8 млрд. лет назад).

Вторым в истории Земли суперконтинентом стал Ур, старейший континент из тех, составные части которого существуют и в настоящее время (входят в состав Австралии, Индии и о. Мадагаскар). Он сформировался около 3 млрд. лет назад, около 2,8 млрд. лет назад стал частью суперконтинента Кенорленд, возникновение которого связано с плюмовыми процессами, которые привели к образованию участков континентальной коры в виде кратонов, гранитных островов и участков суши. Эти участки существовали одновременно с Уром, однако были слишком мелкими, чтобы их можно было считать континентами. В последующем произошла аккреция существовавших участков суши в единый континент с образованием суперконтинента Кенорленд, согласно палеомагнитным исследованиям, находившимся в низких широтах. На время между распадом Кенорленда и формированием следующего суперконтинента – Колумбии – приходится Гуронское оледенение (2,4–2,1 млрд. лет назад), являющееся одним из самых древних и продолжительных оледенений в истории Земли. Его возникновение связывают с кислородной катастрофой – увеличением уровня кислорода в атмосфере, вырабатываемого фотосинтезирующими бактериями. Это повлекло за собой резкое снижение количества метана (основного парникового газа), который соединялся с кислородом и превращался в углекислый газ и воду. Это привело к сокращению численности метаногенов – архей, вырабатывавших метан, что еще больше снизило его концентрацию. Исчезновение парникового эффекта привело

к резкому похолоданию. Указывается, что сопутствующей причиной столь масштабного, мощного и длительного похолодания может быть парадокс слабого молодого Солнца [2]

С 2 млрд. лет назад начал формироваться суперконтинент Колумбия, включавший в себя почти все постепенно соединившиеся континентальные блоки Земли.

Предположение о его существовании было выдвинуто в 2002 г. на основании геологических и палеомагнитных исследований [3, 4]. Время существования оценивается в 1,8–1,5 млрд. лет назад, после чего началась дезинтеграция кратонов, и окончательный распад Колумбии произошёл 1,3–1,2 млрд. лет назад. Протяжённость материка с севера на юг составляла около 12,9 тыс. км, с запада на восток – 4,8 тыс. км.

Будучи уже единым суперконтинентом, размер Колумбии постепенно рос за счёт аккреции на его краях. Впоследствии после распада материка составляющие его кратоны вошли в состав Лаврентии, Фенносарматии (Балтики), Украинского и Амазонского щитов, Австралии и, возможно, Сибири, Сино-Корейской и Калахарийской платформы.

Около 1,1 млрд. лет назад в эпоху неопротерозоя предположительно возник новый суперконтинент Родиния, также объединивший все континентальные блоки и омывавшийся гигантским океаном Мировия (существовал 1600–850 млн лет назад). На время существования Родинии в криогении и раннем эдиакарии приходится гипотеза «Земли-снежка». Предполагается, что в это время почти вся суша Земли была покрыта льдом мощностью около 2 км; она омывалась водами океана, также покрытого льдом, а в районе экватора температура была, как в современной Антарктиде. Низкая температура поддерживалась высоким альбедо снега и льда, которые отражали поступающее солнечное излучение от Земли. Этому способствовало почти полное отсутствие облаков, так как вся влага была в замороженном состоянии. Лишь после накопления в атмосфере значительного количества углекислого газа (около 13 %), при невозможности утилизации его в результате выветривания силикатных пород, покрытых льдом, а также метана вследствие вулканической деятельности, возник парниковый эффект и стало возможным таяние ледников сперва в тропических, а затем и в других областях.

Обнажившиеся ледниковые отложения подвергались интенсивному выветриванию, продукты которого, во множестве содержавшие такие биогены, как фосфор, вместе с большим количеством углекислого газа вызвали взрывообразный рост цианобактерий и резкое повышение уровня кислорода в атмосфере, что создало предпосылки к развитию многоклеточной жизни и, возможно, впоследствии стало толчком к возникновению эдиакарской биоты и кембрийского взрыва – очень быстрого возникновения и развития разнообразных форм живых организмов в кембрийский период – первый период палеозоя.

Развитие многоклеточной жизни пришлось на эдиакарий (около 600 млн. лет назад), осколки уже распавшегося континента Родинии перемещались на север, а Мировия превратилась в океаны Панталасса и Панафрикан. По одной из гипотез, выдвинутой в 2017 г., распад Родинии может быть связан со столкновением Земли с планетой-странником [5].

Из осколков Родинии (Прото-Гондваны, Прото-Лавразии и вклинившейся между ними Конголезской платформы) 600 млн. лет назад сформировался суперконтинент Паннотия, впервые описанный в 1997 году. В период максимального развития он по форме напоминал букву V, открытую на северо-восток и ограничивающую океан Панталасса. С внешней стороны омывался океаном Панафрикан. Распад материка произошёл уже через 60 млн. лет после его формирования, около 540 млн. лет назад. В результате его распада образовался крупный континент Гондвана и небольшие континенты Фенносарматия (состоявшая из Скандинавии и Восточно-Европейской платформы), Ангариды (Сибирь), Лаврентия (восточная и центральная Канада).

Между Фенносарматией и Ангаридой существовал Уральский океан, исчезнувший в каменноугольном периоде в результате схождения материков, вызвавшее образование

на его месте Уральских гор. В результате коллизии Лаврентии и Фенносарматии в районе экватора образовался континент Лавруссия (а в зоне коллизии сформировались Аппалачские горы), на котором растительность впервые вышла на сушу, образовав сначала огромные тропические болота, а затем леса, которые превратились в древнейшие залежи каменного угля. Между Лавруссией и Сибирью существовал небольшой материк Казахстана (1,3 млн. км<sup>2</sup>). Из других небольших континентальных участков следует отметить Сино-Корейскую и Южнокитайскую платформы, объединившиеся в начале палеозоя с образованием гор Циньлин.

335 млн. лет назад возник объединивший почти всю сушу суперконтинент Пангея, просуществовавший до 175 млн. лет назад. Пангея была последним суперконтинентом в истории Земли. В юрском периоде Пангея раскололась на Гондвану (на юге) и Лавразию (на севере), которые разделялись океаном Тетис. Между восточной Северной Америкой и северо-западной Африкой начал формироваться Атлантический океан. Входившие в состав Лавразии Евразия и Гренландия с Северной Америкой разделились около 60 млн. лет назад, в начале палеоцена, первой эпохи палеогена.

В состав Гондваны входили современные Африка, Южная Америка, Антарктида, Австралия, Новая Зеландия, Мадагаскар, Индостан, Аравия. 150 млн. лет назад Гондвана раскололась на западную (Африка, Южная Америка, Аравия) и восточную (Антарктида, Австралия, Новая Зеландия, Мадагаскар, Индостан) части, границей между которыми стал Мозамбикский пролив.

Около 120 млн. лет назад от восточной части отделился континент, включавший современные территории острова Мадагаскар и полуострова Индостан («Индигаскар»), а также Австрало-Антарктида. Между этими частями начал формироваться Индийский океан. Около 90 млн. лет назад от Мадагаскара отделилась Индостанская плита и начала перемещение на север со скоростью около 20 см в год. Такая быстрая скорость по сравнению с другими плитами вызвана, как предполагается, значительно меньшей её мощностью. Около 55–50 млн. лет назад Индостанская плита начала сталкиваться с Евразийской, в результате чего сформировались Гималаи и Тибетское нагорье.

В эоцене также началось отделение другого осколка Гондваны – Аравийской платформы от Африканской платформы, и образовалось Красное море. В олигоцене Аравийская платформа присоединилась к Евразийской и сейчас дрейфует на север.

100 млн. лет назад произошло начало разделения Африки и Южной Америки, и Атлантический океан стал приобретать современные очертания. Около 40 млн. лет назад произошло разделение Австралии и Антарктиды. Примерно в это же время образовался пролив Дрейка, отделивший от Антарктиды Южную Америку. Около 25–30 млн. лет назад пролив Дрейка стал достаточно широким, чтобы сформировалось мощное циркумполярное холодное течение Западных Ветров, изолирующее Антарктиду от тёплых вод, вследствие чего на ней появляется и развивается ледниковый щит.

Предполагается, что через 60 млн. лет Австралия объединится с Восточной Азией с образованием крупной горной цепи, через 130 млн. лет к ним присоединится Антарктида. Евразия продолжит вращение по, а Северная Америка против часовой стрелки, вследствие чего через 250 млн. лет Британские острова окажутся в районе северного полюса, а Аляска в субтропическом поясе; Средиземное море сомкнётся и на его месте возникнут горы, по масштабу схожие с Гималаями; вся суша объединится в единый континент (Пангея Ультима), около 90 % которого будут составлять пустыни.

Основные выводы:

1. Наиболее изучены процессы формирования, существования и распада последнего суперконтинента Пангеи. Лишь в последние десятилетия на основе геологических и палеомагнитных данных стали появляться гипотезы о существовании древних суперконтинентов архей-протерозойского возраста.

2. Океаническая и континентальная земная кора резко различаются как по составу, так и по возрасту: самые старые участки океанической коры имеют возраст 100–150 млн. лет, так как для неё характерно постоянное обновление, обусловленное спрединго-субдукционным механизмом.

3. В будущем ожидается формирование нового суперконтинента Пангея Ульtima.

### Литература

- 1 Hawkesworth, C. J. The generation and evolution of the continental crust / C. J. Hawkesworth [et al.] // Journal of the Geological Society. – 2010. – Vol. 167. – P. 229–248.
- 2 Feulner, G. The faint young Sun problem / G. Feulner // Reviews of Geophysics. – 2012. – Vol. 50. – Issue 2. – Mode of access : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2011RG000375>. – Date of access : 03.04.2021.
- 3 Zhao, G. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup / G. Zhao, M. Sun, S. A. Wilde // Earth-Science Reviews. – 2004. – Vol. 67. – P. 91–123.
- 4 Bispo-Santos, F. Columbia revisited: Paleomagnetic results from the 1790 Ma colider volcanics (SW Amazonian Craton, Brazil) / F. Bispo-Santos [et al.] // Precambrian Research. – 2008. – Vol. 164. – P. 40–49.
- 5 Zhang, X. On a Possible Giant Impact Origin for the Colorado Plateau / X. Zhang // Cornell University. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1711.03099.pdf>. – Date of access: 03.04.2021.