

Потоки летучих компонентов в верхних оболочках Земли как отражение глубинных геодинамических процессов

Ярмолюк В.В.¹, Коваленко В.И.¹, Наумов В.Б.²

¹ *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии, Москва, Россия*

² *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, Москва, Россия*

Выполнен анализ распределения потоков летучих между мантией и внешними оболочками Земли: корой, гидросферой и атмосферой. В его основу были положены представления о наличии баланса между массами летучих, выносимыми совместно с магматическими расплавами на поверхность Земли, массами этих летучих, поглощенными в недрах совместно с субдуцированной литосферой, а также их массами, содержащимися во внешних оболочках. Геодинамической основой модели баланса стали представления о ведущей роли тектоники литосферных плит и геодинамики мантийных плюмов в формировании коры Земли, а также предположения о том, что скорости геологических процессов в течение геологического времени менялись незначительно.

В результате обобщения данных по содержанию воды, хлора, фтора и серы в расплавных включениях и закалочных стеклах, характеризующих составы природных магм, оценены средние содержания летучих в магматических расплавах ведущих геодинамических обстановок: срединно-океанических хребтов (СОХ), океанических островов и лавовых плато (ОО), островных дуг и активных континентальных окраин (АКО), внутриконтинентальных магматических областей (КР). На их основе выполнены оценки масс летучих, вынесенных с расплавами на поверхность Земли с начала ее формирования. Масштабы нисходящих потоков летучих определялись на основе данных о содержании этих летучих в породах коры, а также на основе оценки количества океанической и континентальной коры, погребенной в зонах субдукции за геологическую историю. Полученные схемы баланса однозначно показали наличие у Земли мощной первичной экзосферы, состав которой определяла вода, в меньшей степени хлор, тогда как участие серы и фтора, вероятно, было несущественным. Масса воды в первичной экзосфере превышала ее массу, содержащуюся в современной гидросфере и коре, более чем в полтора раза. В судьбе первичного океана решающую роль сыграли процессы субдукции. За геологическую историю через эти зоны было поглощено такое количество воды, которое сопоставимо с ее содержанием во всех современных внешних оболочках. Балансовые расчеты показывают, что через зоны субдукции были рециклированы практически весь хлор первичной экзосферы Земли, а также преобладающая масса серы и около 60 % массы фтора, которые выделились совместно с расплавами за геологическую историю. С рециклированной литосферой связывается появление обогащенных мантийных источников, питающих магматизм внутриплитных обстановок. Об этом, в частности, свидетельствуют полученные нами данные об обогащении

магм ОО и КР по сравнению с расплавами $\text{COX H}_2\text{O}$ более чем в 1,5 раза, Cl более 2,5 раз, F более 4 раз. Рассмотрены вопросы связи между наличием мощной первичной водной экзосферы Земли и особенностями ее геодинамического развития на протяжении геологической истории.

Введение

Формирование внешних оболочек Земли (континентальной и океанической коры, гидросферы и атмосферы) является главным результатом глобальных геодинамических изменений нашей планеты, приведших ее от состояния смеси космического материала до современного облика. Летучие компоненты (H_2O , CO_2 , Cl, F, S) играли существенную роль в этих процессах, являясь главными или существенными компонентами гидросферы, атмосферы и литосферы. Важнейшим источником летучих компонентов во всех современных внешних оболочках Земли является мантия, магматическая дифференциация которой, как полагают, привела к образованию упомянутых оболочек. В современных геодинамических концепциях существенное значение наряду с восходящими играют также возвратные потоки вещества, которые связаны с поглощением литосферного материала в зонах субдукции и коллизии и, таким образом, компенсирующие рост океанической коры в срединно-океанических хребтах. С этими движениями в мантию возвращается не только силикатное вещество, но и определенная доля летучих компонентов, то есть осуществляется так называемый рециклинг последних. В свете этих представлений, очевидно, что необходимо изучать баланс между массами летучих компонентов в экзосфере и глубинными оболочками Земли или между массами этих компонентов, с одной стороны, поступившими в верхние оболочки планеты совместно с магматическими расплавами из мантии, и, с другой стороны, вовлеченных в возвратные процессы рециклинга. В настоящей статье мы рассматриваем динамику летучих компонентов между оболочками Земли на основе баланса между разнонаправленными потоками вещества, допуская, что движение этих потоков регулировалось тектоникой литосферных плит и глубинной геодинамикой плюмов [28], сочетание которых предполагает нелинейный характер геологических процессов, ответственных за образование важнейших геосфер Земли. Это направление наук о Земле развивает Ю.М. Пушаровский [14, 15] Оценка балансов вещества в геодинамических процессах особенно важна для летучих компонентов, которые господствуют в экзосфере, включая гидросферу и атмосферу, и легко перераспределяются между нею и мантией. До сих пор усиленно дискутируются две крайние модели образования экзосферы Земли - магматической дегазации и космической аккреции [23]. С помощью балансов летучих компонентов мы хотим показать, что эти модели согласуемы. Отметим также, что рециклинг летучих компонентов в глубокой мантии считается ответственным за вещественные неоднородности мантии [35],

которые приводят к нелинейным эффектам в мантийной геодинамике. В частности, в последней цитированной работе показано, что температура погружающейся в зоне субдукции плиты при данной глубине снижается нелинейно с увеличением скорости субдукции, которая, как предполагается была высокой в меловую, раннепалеозойскую и, вероятно, раннеархейскую эпохи Земли. Тем самым холодный субдуцируемый материал в эпохи быстрой (до 20 см/год) субдукции, погружается на большие глубины по сравнению с обычными скоростями (3-12 см/год) и создает упомянутые выше мантийные неоднородности. При этом меняется реология процесса субдукции, а также характер мантийной циркуляции. Статья основана на материалах, изложенных в докладе на конференции «Глубинные флюиды и геодинамика» в ГИНе (2003). Геохимические аспекты глобального баланса хлора и воды и геохимическая специфика источников этих элементов в различных геодинамических обстановках были рассмотрены нами ранее [6].

Основы подхода к оценке баланса летучих компонентов в геологических процессах

Общая схема баланса летучих компонентов отображена на рис. 1. В ее основу положены следующие принципы.

1. Основные массы летучих, участвующие в геологических процессах в верхних оболочках Земли, формируются за счет первичного их содержания в экзосфере зародившейся Земли и за счет ювенильных добавок, связанных с их поступлениями из мантии при магматической деятельности (потоки *a*, *б*, *в* и *в** на рис. 1). Баланс современного распределения летучих компонентов из этих двух источников определяется по соотношению содержания этих компонентов во внешних оболочках (океанической и континентальной коры и гидросферы), а также их содержания в составе рециклированной литосферы (поток *г* на рис. 1).

2. Основной объем мантийных магм извергается в срединно-океанических хребтах (СОХ), на океанических островах и океанических плато (ОО), в континентальных рифтах и во внутриконтинентальных областях (КР), связанных с горячими точками, а также в островных дугах и активных континентальных окраинах (ОД+АКО). В ходе магматических извержений летучие компоненты, содержащиеся в магмах, частично дегазируют из расплавов и накапливаются в атмосфере и гидросфере, частично консервируются в магматических породах земной коры.

3. В обстановках ОД+АКО поступление летучих в магматические расплавы происходит в результате плавления субдуцируемой литосферы (поток *б** рис. 1 - рециклированный компонент восходящего потока летучих), а также за счет частичного плавления мантийного клина (поток *а** рис. 1 - ювенильный компонент).

4. После частичного плавления пород субдуцируемой коры сохранившаяся в ней часть летучих вместе с литосферой погружается в

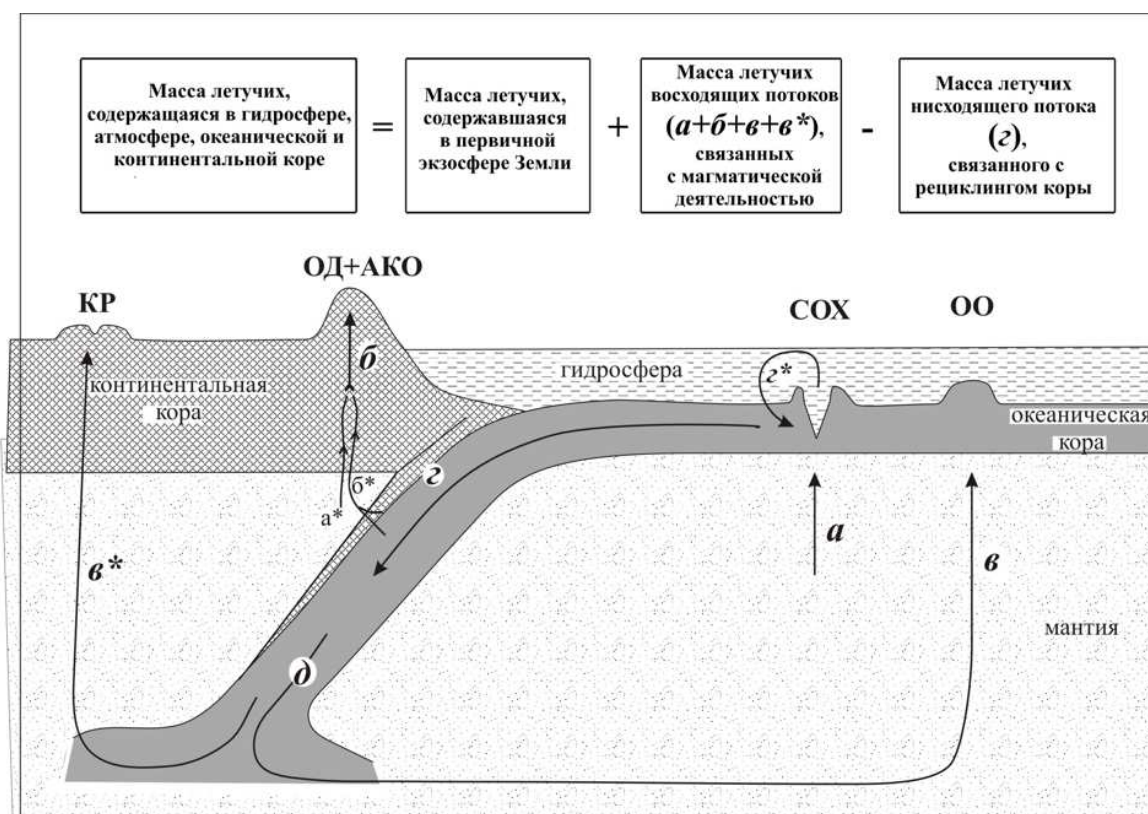


Рис.1. Модель баланса масс летучих компонентов и распределения их потоков в структурах разных геодинамических обстановок.

Геодинамические обстановки: СОХ – срединно-океанических хребтов, ОО – океанических островов и лавовых плато, ОД+АКО – островных дуг и активных континентальных окраин, КР – континентальных рифтов. Потоки летучих: 1 - восходящие, связанные с магматизмом: a - СОХ, b – ОД+АКО (в том числе составляющие его ветви - a^* , сформированная при плавлении мантийного клина, и b^* , образованная при плавлении субдуцированной плиты), v - ОО, v^* - КР; 2 – нисходящие, представляющие массы летучих в составе пород: $г$ – субдуцированной плиты, $д$ – субдуцированной плиты, после термальной ее переработки в зоне субдукции.

глубины мантии (поток z рис. 1), обеспечивая в результате свое возвращение (глубинный рециклинг) в глубокую мантию, откуда исходили их ювенильные потоки.

Таким образом, идея баланса сводится к сопоставлению двух принципиально разных и противоположно направленных потоков летучих, действующих между мантией и экзосферой Земли. Один из них, направленный вверх из мантии, в балансовой схеме выделен в качестве ювенильного компонента. Другой поток направлен вниз, в мантию и реализуется в обстановках конвергентных границ литосферных плит, служащих зонами стока литосферного вещества в мантию Земли. Кроме того, в схему баланса нами введен гипотетический элемент, отвечающий первичной экзосфере планеты, возникший, скорее всего, при ее аккреции. Его выделение связано с тем, что априори мы не можем отрицать

существование последней на ранних стадиях развития Земли, и, как будет показано ниже, участие этой экзосферы в балансе летучих будет играть определяющую роль, по крайней мере, для воды и хлора.

Важно отметить, что при построении моделей баланса мы приняли постулат о ведущей роли тектоники литосферных плит и мантийных плюмов или в целом глубинной геодинамики [1, 28] в процессах формирования и преобразования континентальной и океанической коры на протяжении всей геологической истории, продолжительность которой принимается равной 4,5 млрд. лет. При этом были сделаны следующие допущения:

- ведущим поставщиком корового материала на земную поверхность являлся магматизм;

- скорость геологических процессов на протяжении геологической истории менялась незначительно;

- доленое участие магматизма разных геодинамических обстановок в формирование континентальной и океанической коры, а также скорость роста коры и ее деструкции на конвергентных границах литосферных плит оставались постоянными на протяжении геологической истории;

- содержание летучих в породах как континентальной, так и океанической коры, а также содержание летучих в магмах разных геодинамических обстановок, оцененное преимущественно на основе данных по составу магматизма мезозоя и кайнозоя, также не менялось во времени.

Все эти допущения позволили предложить принципиальную модель распределения основных геодинамических потоков воды, хлора, фтора и серы между верхними оболочками Земли, изображенную на рис. 1, действие которой мы распространяем на всю геологическую историю. Летучие компоненты выносятся магмами СОХ (поток «а»), частично они остаются в образующейся в этой обстановке океанической коре, а частично могут уходить в гидросферу. Океаническая кора за счет конвективных гидротермальных систем с участием морской воды гидратируется и, видимо, несколько обогащается, по крайней мере, водой и хлором (поток «г*» на рис. 1). Литосфера с гидратированной океанической корой, а также с фрагментами тектонически эродированной континентальной коры поступает в зоны субдукции (поток «г»). Для простоты мы рассматриваем образование флюидного состава магм ОД+АКО (поток «б» на рис. 1) как результат взаимодействия продуктов плавления мантийного клина (поток «а*») и субдуцируемой океанической и континентальной коры (поток «б*»). Сохранившиеся в погружающейся плите летучие (поток «д» на рис. 1) транспортируются в глубокую мантию, участвуя в образовании источников ОО и КР через рециклинг литосферы. Очевидно, что для балансовой оценки всех этих потоков нам необходимо знать средние содержания и массы этих компонентов в гидросфере, континентальной и океанической коре, в магмах СОХ, ОО, ОД+АКО и КР, а также массы воды и хлора, рециклированные за геологическую историю Земли.

Оценка содержания летучих компонентов в геологических средах

В проблеме связи потоков летучих компонентов с геодинамикой ключевую роль играют надежные оценки содержания летучих компонентов в природных мантийных магмах различных геодинамических обстановок, в земной коре, гидросфере и атмосфере, а также реконструкция потоков этих летучих между геосферами. Наиболее сложными среди этих оценок являются определения содержания летучих в магматических расплавах, которые до недавнего времени были ориентировочными, и прямыми методами были установлены лишь в последние годы. В основу этих оценок, прежде всего, были положены данные локального анализа летучих компонентов в расплавных включениях в минералах магматических пород [3-5, 10-13]. Такие включения являются фрагментами природных магм, захваченными растущими из магмы кристаллами и законсервированными вплоть до момента их вскрытия при исследовании. Кроме того, важным источником данных о содержании летучих в магмах стали результаты изучения закалочных стекол, образовавшихся при глубоководных излияниях на дно океанов и морей в условиях, когда давление водяного столба превышает внутреннее давление летучих в расплавах и поэтому препятствует образованию газовой фазы и выходу летучих из расплава (стекла).

подавляющее количество использованных нами анализов рассматриваемых летучих компонентов в расплавных включениях и закалочных стеклах было выполнено ионным (H_2O , F) и электронным (Cl, S) зондами [29], FTIR (H_2O , [28]), а также высокотемпературной масс-спектрометрией [21]. Аналитические параметры этих методов приведены в оригинальных публикациях, а обзор аналитических подходов к изучению вариаций содержаний летучих компонентов в магматических процессах представлен в монографии [4]. В данной статье использованы как многочисленные оригинальные данные авторов, так и опубликованные другими исследователями анализы, которые уже много лет включаются в банк данных по расплавным включениям [3-6, 10-13]. Полученные на их основе оценки содержания летучих в расплавах разных геодинамических обстановок приведены в табл. 1.

Для характеристики представительности опробования летучих в магмах разных геодинамических обстановок укажем, что нами были использованы около 20000 определений их содержания. Места отбора проб схематически показаны на карте рис. 2. Опробование проводилось по породам главных современных геодинамических обстановок проявления магматизма, а также по породам их палеоаналогов (офиолитовых и островодужных комплексов, комплексов пород древних АКО, континентальной коллизии, а также областей древней внутриплитной активности).

Средние содержания H_2O , Cl, S, F в породах океанической, континентальной коры и в гидросфере оценены А. Б. Роновым и соавторами [17,19,33], уточнены позднее [8,18] и приведены в табл. 1. Расчет содержания

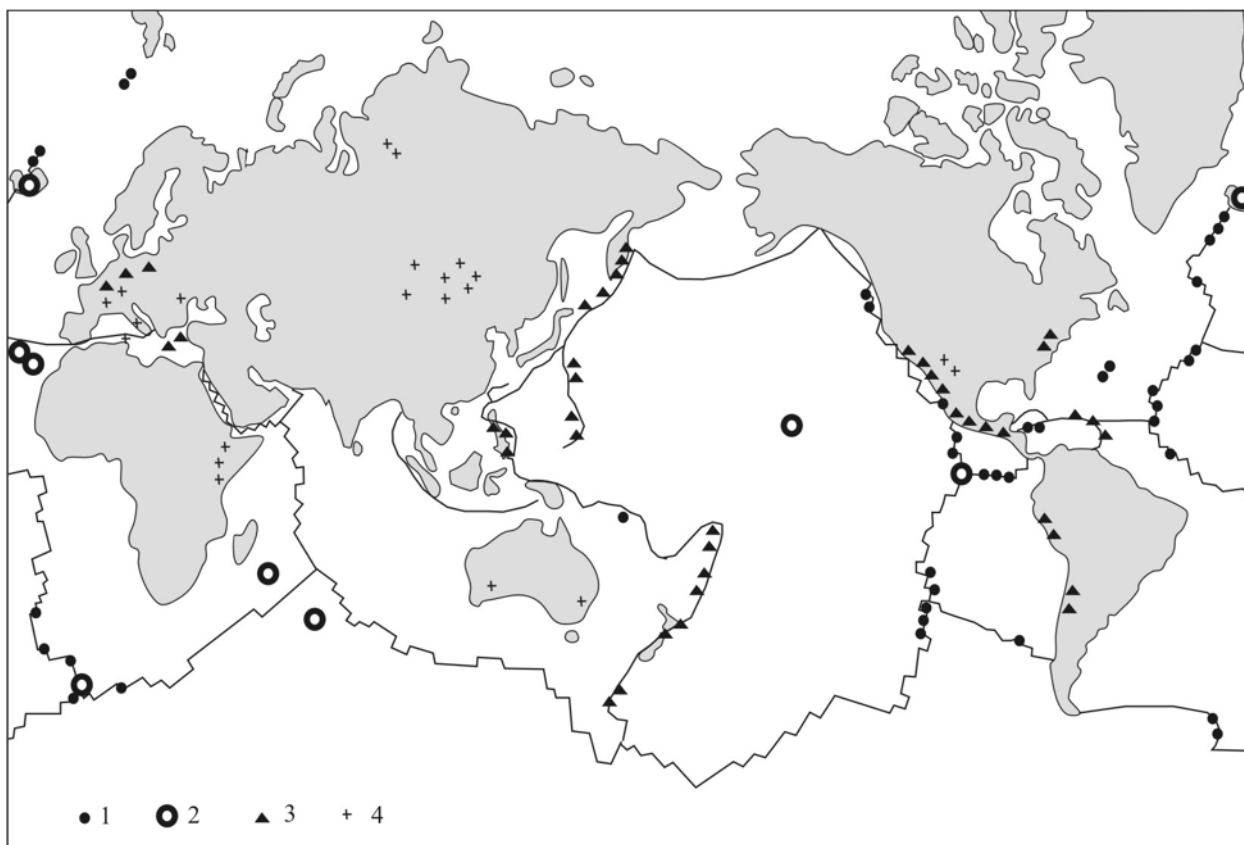


Рис. 2. Расположение районов отбора проб, представленных в базе данных по содержанию летучих в магматических расплавах разных геодинамических обстановок.

1 – срединно-океанические хребты, 2 – океанические острова, 3 – островные дуги и активные континентальные окраины, 4 – континентальные рифты.

и массы этих летучих в оболочках Земли проводился, исходя из модели ее строения и состава, предложенной А.Б. Роновым и его школой в [19, 33]. Модель является в основе своей эмпирической и базируется на обширном материале по распространенности и химическому составу пород, слагающих осадочную и гранитно-метаморфическую оболочки Земли [17]. В настоящей статье эти данные по сравнению с предыдущими публикациями пополнены новыми материалами, учитывающими, в частности, результаты детальных геохимических исследований «модельных регионов» (Восточно-Европейской и Сибирской древних и Скифской молодой платформ, Уральской, Кавказской, Карпатской и Центрально-Европейской складчатых зон и др.). Учтены также результаты аналогичных исследований в пределах кристаллических щитов и фундаментов платформ, в пределах осадочного слоя Тихого, Атлантического и Индийского океанов. В целом, для характеристики различных типов пород и осадков в определенных тектонических зонах А.Б. Роновым с соавторами [19] были проанализированы десятки тысяч образцов, что определило признание этих данных, во всяком случае, для стратисферы, в качестве одних из наиболее достоверных в геологической литературе.

Таблица 1.

Содержания и массы летучих в расплавах, сформировавших литосферную оболочку, в породах коры и в гидросфере

Оболочки Земли (1) и их масса (2) по [18]		Содержание* (а) и масса** (б)							
		H ₂ O		Cl		S		F	
1	2	а	б	а	б	а	б	а	б
<i>В расплавах***, сформировавших кору</i>									
Континентальная и субконтинентальная кора, включая субдуцированную за геологическую историю (за 4,5 млрд. лет), в том числе сформированная в обстановках:	3348		44,11		3,94		2,71		2,29
островных дуг и активных континентальных окраин (ОД+АКО),	2243	1,69	37,91	0,14	3,14	0,078	1,75	0,051	1,14
континентальных рифтов и горячих точек (КР)	184	1,17	2,15	0,248	0,46	0,099	0,18	0,2	0,37
океанических поднятий, плато и островов (ОО)	921	0,44	4,05	0,037	0,34	0,085	0,78	0,085	0,78
Океаническая кора, сформированная в СОХ за геологическую историю:	22000	0,33	72,6	0,014	3,08	0,111	24,42	0,023	5,06
Всего возникло при формировании океанической и континентальной коры:	25348		116,71		7,02		27,13		7,35
<i>В породах, слагающих кору, и в гидросфере</i>									
Современная континентальная кора -	2232	0,77	17,19	0,071	1,58	0,11	2,46	0,064 ³	1,43
Современная океаническая кора -	614	0,85	5,22	0,019	0,12	0,101	0,62	0,019	0,12
Всего современной коры -	2846		22,41		1,70		3,08		1,55
Гидросфера	135,8		135,8	1,9	2,7	0,09	0,13		<0,01
Всего в гидросфере, океанической и континентальной коре	2981,8		158,21		4,40		3,21		1,55
<u>Рециклированная кора:</u>									
континентальная -	1116	0,77	8,59	0,071	0,79	0,11	1,23	0,064	0,71
океаническая -	21386	0,85	181,8	0,019	4,06	0,101	21,6	0,019	4,06
Всего -	22502		190,39		4,85		22,83		4,77

Примечание. * содержание в мас.%; ** масса в 10²²г; *** о подходах к оценке среднего содержания летучих в расплавах разных геодинамических остановок см. текст.

Оценка вклада пород разных геодинамических обстановок в процессы корообразования

Для обоснования схемы баланса помимо оценки содержания летучих в магматических расплавах и породах, о которых говорилось выше, необходимы также оценки массы океанической и континентальной коры, включая их рециклированные за геологическую историю количества. Соответствующие оценки последних отражены в табл. 2. Эти оценки учитывают реконструкции объема, массы и состава коры, выполненные Роновым с соавторами [19, 33], а также подходы к определению масштабов корообразующих процессов, изложенные в работах [22, 32, и других]. Вслед за многими исследователями мы полагаем, что формирование континентального блока Земли происходило в геодинамической обстановке ОД+АКО, а также в результате переработки коллизионными и субдукционными процессами субконтинентальной по терминологии [22, 32] коры, возникшей в обстановке ОО и КР. В соответствии с данными А.Б. Ронova и др. [19, 33] масса континентальной коры составляет 2232×10^{22} г ($8,10 \times 10^9$ км³) и, следовательно, годовой ее прирост равняется 1,8 км³/год. Это близко к величине 1,72 км³/год, полученной А.Реймером и Г. Шубертом [32], по оценкам которых современный рост коры обеспечивается вкладом магматических продуктов магматических дуг (67 мас.%), океанических островов и плато (27,5 мас.%), а также внутриконтинентальных (внутриплитных) магматических областей (в 5,5 мас.%) (табл. 2). Указанные выше оценки прироста коры отвечают примерно 2/3 от ее общего роста, тогда как одна треть новообразованной коры поглощается в зонах субдукции за счет тектонической эрозии. Распространяя эти оценки на геологическую историю, получим объем существующей и субдуцированной континентальной коры и вклад в ее состав продуктов разной геодинамической природы (табл. 2). Здесь дополнительно отметим, что в формировании ОД+АКО участвовали магмы разного состава. Следуя данным [19], мы приняли, что состав континентальной коры, как и состав магматических комплексов АКО, эквивалентен составу магматических пород разного состава, взятых в пропорции (в об. %): основные – 56.5, средние – 33.9, кислые – 9.6, не учитывая, как отмечалось выше, что, скорее всего, эти соотношения менялись во времени. Это позволило нам оценить среднее содержание летучих в породах ОД+АКО [6]. В проявлениях внутриплитного магматизма (ОО и КР) вклад магм среднего и кислого состава имел резко подчиненное значение. Поэтому оценки связанных с этим магматизмом потоков летучих осуществлялись на основе данных об их содержании в основных расплавах.

Породы океанического сектора Земли фиксируют только тот их объем, который был сформирован примерно за последние 150 миллионов лет геологической истории Земли. Более древние магматические породы океанического блока считаются субдуцированными (рециклированными) в

Таблица 2.

Вклад пород разных геодинамических обстановок в состав океанической и континентальной коры Земли и массы этих пород, вовлеченные в рециклинг за геологическую историю (на основе данных Ронова и др., 1992; Reimer, Schubert, 1996)

Типы коры	Современный прирост коры в км ³ /год	Масса современной коры, в 10 ²² г	Масса коры, рециклированная за геологическую историю, в 10 ²² г	Общая масса коры, сформированная за геологическую историю, в 10 ²² г
Океаническая кора (ОК)	17	614	21386	22000
Континентальная и субконтинентальная кора (КК)	1,8	2232	1116	3348
В том числе сформированная в обстановках (в скобках доля в составе КК в %):				
островных дуг, активных окраин и задуговых бассейнов	1,2 (67)	1495	748	2243
океанических плато и островов	0,5 (27,5)	614	307	921
внутриконтинентальных магматических областей	0,1 (5,5)	123	61	184

допозднемезозойскую геологическую историю и не сохранились до настоящего времени. Однако, мало кто сомневается, что такие магмы извергались и ранее [7, 22, 36], поэтому мы распространили современную скорость роста океанической коры (~17 км³/год) на всю историю Земли, получив в результате суммарную массу равную 22000x10²²г. Современная масса океанической коры составляет 614x10²²г, откуда следует, что за геологическую историю было субдуцировано не менее 21386x10²²г этой коры, увлекшей с собой в недра планеты значительные массы воды, хлора, фтора, серы, которые учитывались в наших балансовых расчетах.

Ниже приведены параметры балансовых построений отдельно для каждого из рассматриваемых летучих компонентов.

Баланс воды (рис. 3)

Сведения о распределении воды в расплавах и породах разных геодинамических обстановок приведены в табл. 1. В соответствии с таблицей за геологическую историю магмами было вынесено воды (в 10²² г):

- при формировании океанической коры в обстановке СОХ - 72,6;

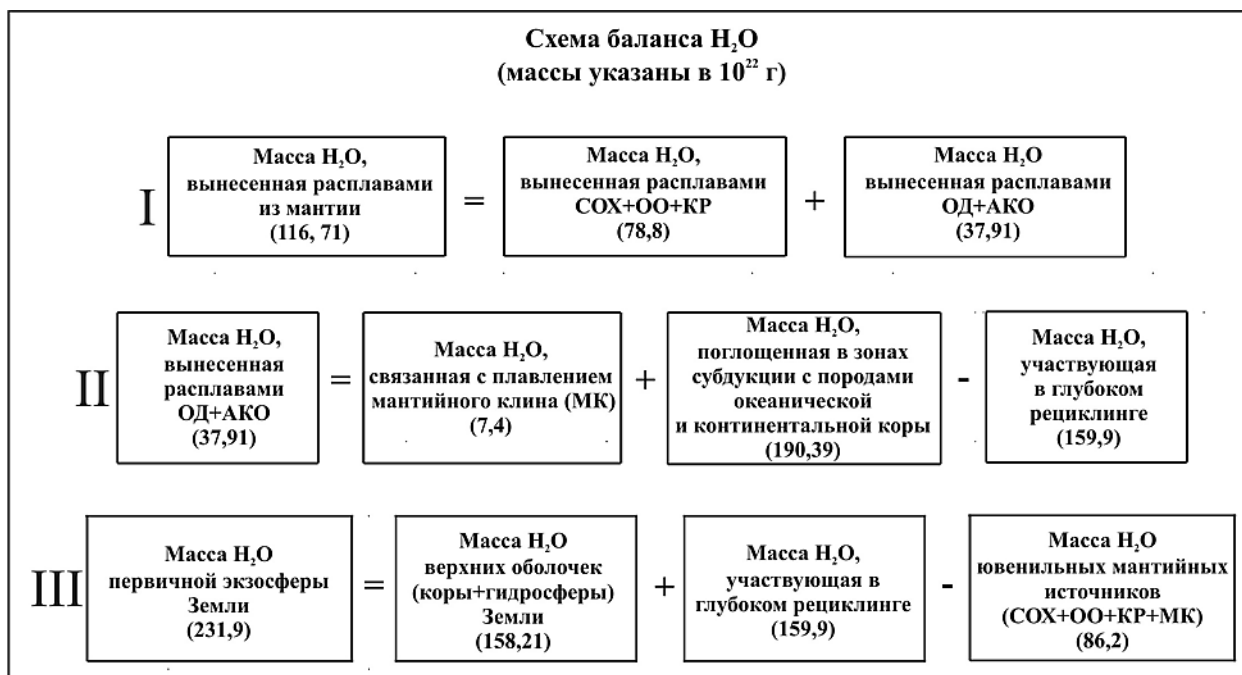


Рис.3. Схема баланса и распределения масс воды в потоках летучих и в верхних геосферах Земли

I – масса H₂O, вынесенная расплавами СОХ+ОО+КР (на дивергентных границах литосферных плит и во внутриплитных областях) и расплавами ОД+АКО (на конвергентных границах литосферных плит); II – массы и источники H₂O, вовлеченные в разнонаправленные потоки в обстановках конвергентных границ литосферных плит; III – баланс масс воды, участвующих в потоках летучих между мантией и верхними оболочками Земли, а также содержащихся в породах коры и в гидросфере.

- при формировании континентальной и субконтинентальной коры в обстановках островных дуг и активных окраин (37,91), континентальных рифтов и горячих точек мантии (2,15), океанических островов, плато и поднятий (4,05) – 44,11.

Таким образом, магматическими расплавами из недр Земли было извлечено – 116,71 x 10²² г воды (табл. 1, рис. 3). Во внешних оболочках, включая рециклированные за геологическую историю их массы, зафиксировано в коре – 212,8 x 10²² г и гидросфере – 135,8 x 10²² г воды (табл. 1), то есть, в каждой из этих оболочек содержится воды больше, чем было вынесено ее из мантии. Из этого следует, что баланс воды между ее частями, вынесенными за геологическую историю магмами из мантии и содержащимися во внешних оболочках, не соблюдается.

На примере анализа потоков воды между разными оболочками мы рассмотрим особенности составления балансовых схем, которые были использованы также при рассмотрении баланса других летучих. Расчет баланса учитывал следующие ключевые моменты:

Обстановка СОХ. Среди восходящих из мантии потоков воды наиболее крупный поток связан с расплавами, формирующими океаническую кору в

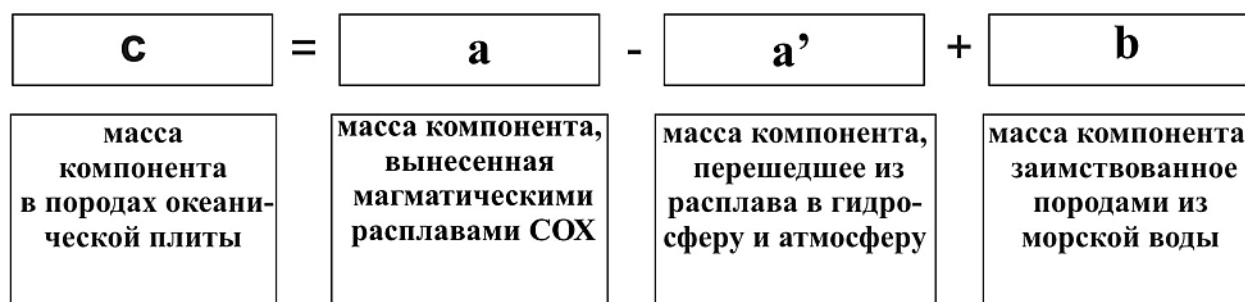
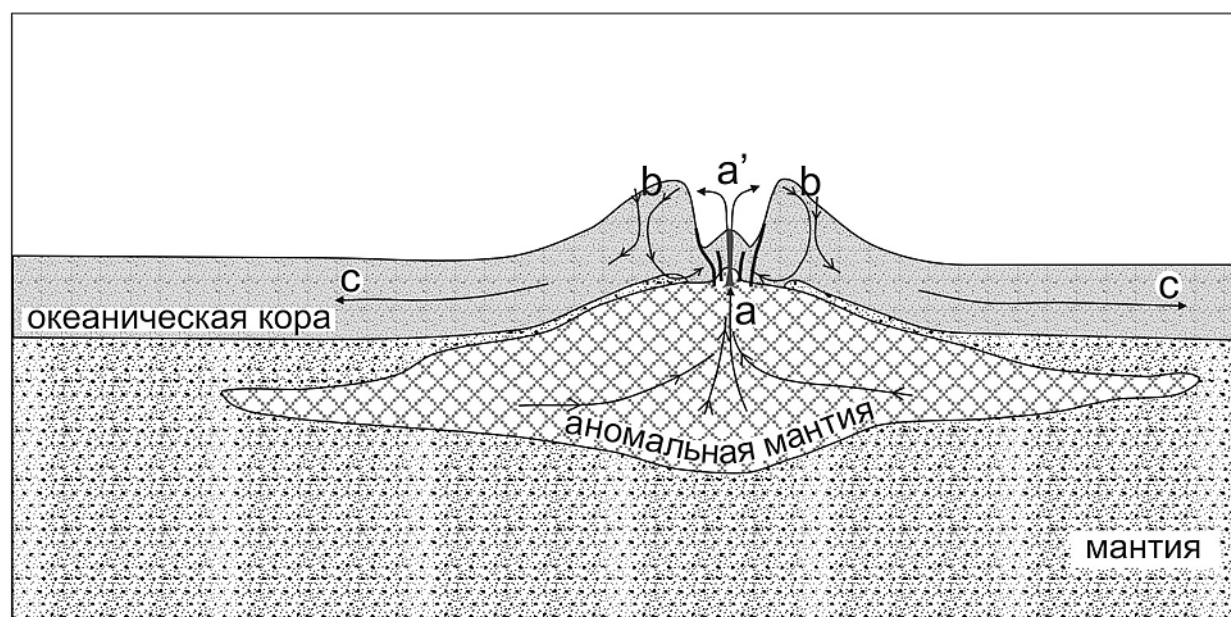
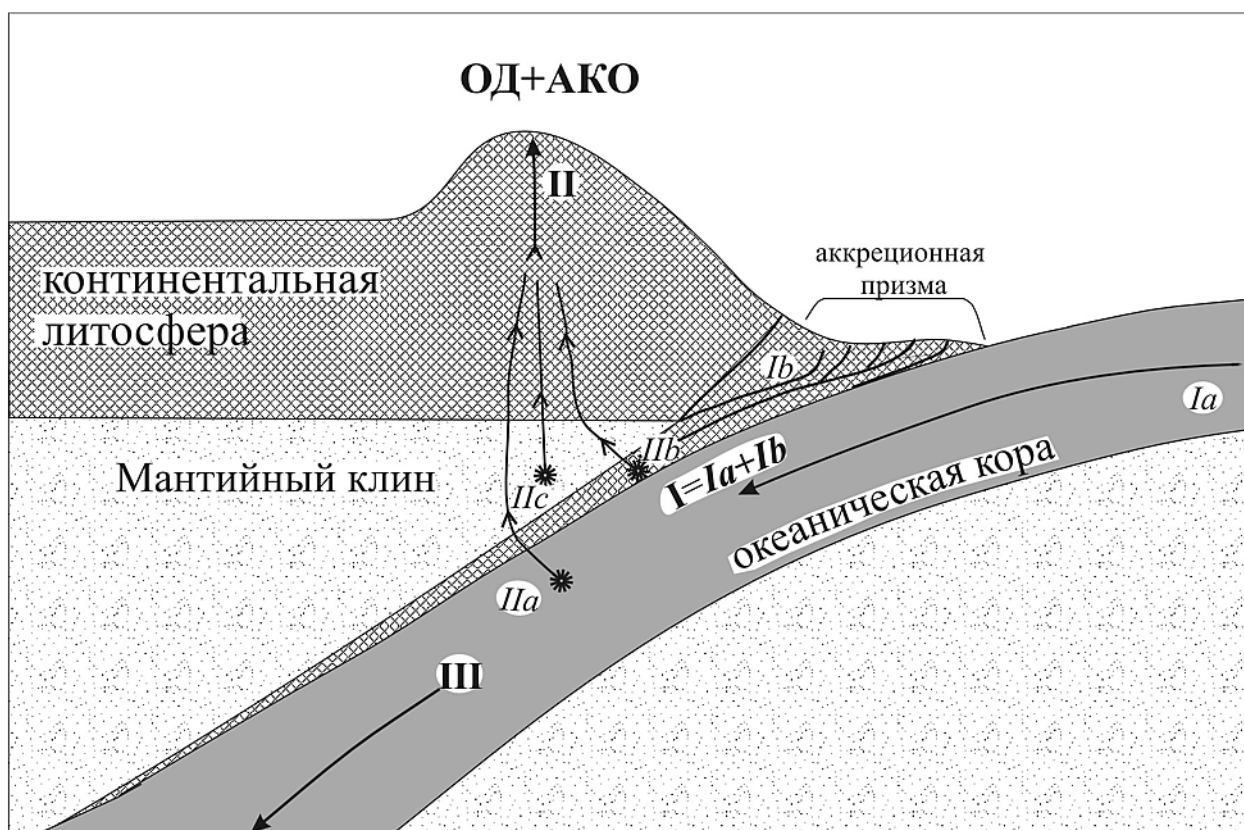


Рис.4. Схема распределения масс и потоков летучих компонентов в обстановке срединно-океанических хребтов.

срединно-океанических хребтах (рис. 4, поток **а**). Содержание воды в расплавах СОХ составляет ~0,33 мас.%, что позволяет оценить ее объем, вынесенной расплавами за геологическую историю в количестве $72,6 \times 10^{22}$ г. Эта вода частично перераспределяется в гидросферу и атмосферу (рис. 4, поток **а'**), частично консервируется в магматических породах. В условиях океанических бассейнов, особенно в обстановках срединно-океанических хребтов действуют мощные конвективно-гидротермальные системы, вследствие которых вода океана поступает в породы океанического дна (рис. 4, поток **б**). Среднее содержание воды в породах океанической коры, включающей помимо магматических пород также ассоциирующие с ними осадочные породы, оценивается в 1 мас.% и, таким образом, вслед за многими исследователями можно констатировать, что породы океанической коры после своего формирования существенно обогащаются морской водой. Гидратированная океаническая кора (включая ее рециклированную часть) вмещает в себя $181,8 \times 10^{22}$ г воды, которая (рис. 4, поток **с**) поступает затем с породами в зоны субдукции.

Обстановка ОД+АКО. Распределение потоков воды на конвергентных границах литосферных плит показано на рис. 5. В зону субдукции здесь во-



$$\boxed{\text{I}} = \boxed{\text{Ia}} + \boxed{\text{Ib}}$$

Масса компонента в субдуцированной плите = **Масса компонента в породах субдуцированной океанической коры** + **Масса компонента в породах аккреционной призмы, вовлеченных в субдукцию**

$$\boxed{\text{II}} = \boxed{\text{IIa}} + \boxed{\text{IIb}} + \boxed{\text{IIc}}$$

Масса компонента, выделенная магмами ОД и АКО = **Масса компонента, выделенная при плавлении: субдуцированных пород океанической коры** + **субдуцированных пород аккреционной призмы** + **пород мантийного клина**

$$\boxed{\text{III}} = \boxed{\text{I}} - \left[\boxed{\text{IIa}} + \boxed{\text{IIb}} \right]$$

Масса компонента, вовлеченного в глубокий рециклинг = **Масса компонента в субдуцированной плите** - **Масса компонента, выделенная при плавлении: субдуцированных пород океанической коры** + **субдуцированных пород аккреционной призмы**

Рис. 5. Схема распределения масс и потоков летучих компонентов в обстановках конвергентных границ литосферных плит.

влекаются породы океанической коры, а также тектонически соскобленные породы континентальной коры [31]. Количество воды, перемещенной (рециклированной) в недра Земли совместно с породами океанического дна за геологическую историю, оценивается величиной $181,8 \times 10^{22}$ г (табл. 1, поток *Ia* на рис. 5). Среднее содержание воды в континентальной коре составляет 0,77 мас.% (табл. 1) и, следовательно, с субдуцированной континентальной корой (поток *Ib* на рис. 5) в мантию было возвращено - $8,59 \times 10^{22}$ г H_2O . Всего же на конвергентных границах в мантию было рециклировано не менее $190,39 \times 10^{22}$ г воды (рис. 5). Противоположную (восходящую) направленность на этих границах имеет поток летучих, связанный с магматизмом ОД+АКО. Его величина оценивается в $37,91 \times 10^{22}$ г. Определенная часть этого потока имеет ювенильный мантийный источник, связанный с плавлением пород мантийного клина (поток *Iic* на рис. 5). Но, вклад ювенильного компонента не должен превысить того количества воды, которое выделилось бы при образовании океанической коры, равной по массе континентальной коре, из мантии СОХ. Это количество оценивается из расчета: масса океанической коры, равная массе коры ОД+АКО, умноженная на среднее содержание воды в магмах СОХ и, таким образом, составляет не более $7,4 \times 10^{22}$ г H_2O . Выделилось же существенно больше ($37,91 \times 10^{22}$ г, рис. 3). Избыток в количестве $30,51 \times 10^{22}$ г H_2O , скорее всего, был извлечен в результате дегидратации материала субдуцированной литосферы при его плавлении (потоки *IIa* и *IIb* на рис. 5). Но это количество воды составляет всего лишь 16% воды, рециклированной совместно с субдуцированной корой.

Распределение воды в условиях глубокого рециклинга. Сохранившаяся в субдуцированной литосфере масса воды составляет $159,88 \times 10^{22}$ г ($190,39 - 30,51$) (рис. 3). Эта вода вовлекается на более глубокие уровни мантии, участвуя, таким образом, в глубоком мантийном рециклинге (потоки «*d*» на рис. 1 и *III* на рис. 5). Мы полагаем, что частично она была вовлечена в источники внутриплитного магматизма (ОО и КР), благодаря чему расплавы этих обстановок были обогащены H_2O по сравнению с расплавами СОХ. Однако, видимо, большая часть этой воды не участвовала в магнообразовании, поскольку в мантийном компоненте ОО и КР соотношение воды к хлору является пониженным (<12) по сравнению с их соотношением в потоках «*d*» на рис. 1 равным 33 ($159,9/4,85$). Если считать, что весь хлор потока «*d*» (рис.1) участвует в источниках внутриплитных магм и принять в этих магмах отношение воды к хлору равным 12, то только $58,2 \times 10^{22}$ г воды должно участвовать во внутриплитном магнообразовании, что составляет лишь 36% воды потока «*d*» (рис. 1). Большая же ее часть, видимо, остается в мантии либо в составе неспособных к перемещению богатых водой магм, либо в качестве агента гидратации мантии [6]. Таким образом, за геологическую историю в результате процессов субдукции мантия Земли приобрела $159,9 \times 10^{22}$ г воды (рис. 3). Скорость поглощения

воды в мантии в среднем за всю геологическую историю составляет около $3,6 \times 10^{14}$ г/год или около $0,36 \text{ км}^3/\text{год}$.

Первичная экзосфера Земли. Избыток воды, отвечающей разнице между массами воды, которая, с одной стороны, содержится в гидросфере и породах коры и, с другой, была вынесена из мантии расплавами, оценивается в $231,9 \times 10^{22}$ г. На наш взгляд (рис. 3), этот избыток отвечает количеству воды, существовавшей в первичной внешней экзосфере ранней Земли. Если учесть количество ювенильной воды ($86,2 \times 10^{22}$ г), выделившейся за геологическую историю, то общий объем воды, участвующий в геологических процессах в верхних оболочках Земли, составит не менее 318×10^{22} г. Часть этой воды вошла в состав коры и гидросферы Земли ($158,21 \times 10^{22}$ г), и примерно такая же часть (более 160×10^{22} г) оказалась вовлеченной во внутримантийный рециклинг. Итак, мы приходим к выводу, что на начальных этапах развития Земля обладала мощной водной атмосферой, масса воды в которой более чем в полтора раза превосходила ее массу в современном океане. При конденсации этой атмосферы должен был возникнуть океан со средней глубиной около 4 км.

Баланс хлора (рис. 6)

Основные параметры балансовой модели поведения хлора в геодинамических процессах представлены в табл. 1. В соответствии с ее данными за геологическую историю магмами было вынесено хлора (в 10^{22} г):

- при формировании океанической коры в обстановке COX - 3,08,
- при формировании континентальной и субконтинентальной коры в том числе рециклированной за геологическую историю в обстановках островных дуг и активных окраин, континентальных рифтов и горячих точек мантии, океанических островов, плато и поднятий – 3,94. Всего за историю Земли расплавами разных геодинамических обстановок из недр было извлечено – $7,02 \times 10^{22}$ г хлора (табл. 1).

Во внешних оболочках, включая рециклированные за геологическую историю их массы, содержится в коре – $6,55 \times 10^{22}$ г и гидросфере – $2,7 \times 10^{22}$ г воды (табл. 1), и, таким образом, как и для воды мы получаем избыточную массу хлора ($2,23 \times 10^{22}$ г) во внешних оболочках по сравнению с ее количеством, выделившимся из мантийных расплавов.

В целом, поведение хлора в основных потоках летучих следующее:

В обстановке COX хлор ведет себя подобно воде [6]. Его содержание в расплавах меньше, чем в породах. Это указывает на гидратацию магматических пород после их формирования под воздействием гидротермально-конвективных систем. Поэтому, если с расплавами в обстановках COX было вынесено $3,08 \times 10^{22}$ г Cl, то в сформированной этими расплавами океанической коре, включая ее рециклированную часть, масса хлора оценивается в $4,06 \times 10^{22}$ г и, таким образом, на 25% представлена хло-

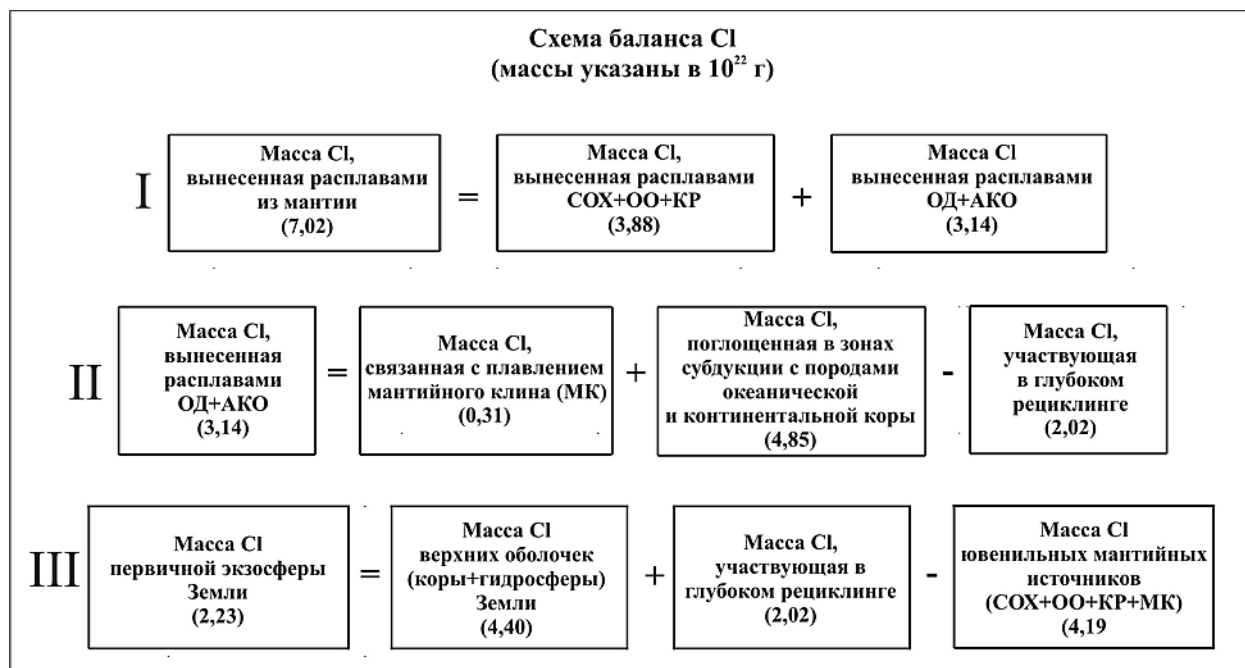


Рис.6. Схема баланса и распределения масс хлора в потоках летучих и в верхних геосферах Земли.

I – масса Cl, вынесенная расплавами COX+OO+KP (на дивергентных границах литосферных плит и во внутриплитных областях) и расплавами ОД+АКО (на конвергентных границах литосферных плит); II – массы и источники Cl, вовлеченные в разнонаправленные потоки в обстановках конвергентных границ литосферных плит; III – баланс масс Cl, участвующих в потоках летучих между мантией и верхними оболочками Земли, а также содержащихся в породах коры и в гидросфере.

ром, заимствованным из морской воды.

Обстановка ОД+АКО (рис. 5). На конвергентных границах литосферных плит за геологическую историю в результате субдукции пород океанической и континентальной коры было поглощено – $4,85 \times 10^{22}$ г хлора, содержащейся в этих породах (поток *Ia* и *Ib* соответственно на рис. 5). С погружением в зону субдукции общий поток субдуцированного хлора (поток **I**, рис. 5) разделяется на две ветви, баланс между которыми описывается соотношением:

$Cl(I) = Cl(IIa+IIb)\uparrow + Cl(III)\downarrow$, где стрелками показаны соответственно восходящая и нисходящая ветви. При этом общий выход хлора с магмами на конвергентных границах составляет:

$Cl_{ОД+АКО} = Cl(IIa+IIb) + Cl(IIc)$, где поток $Cl(IIc)$ связан с плавлением мантийного клина. Как уже отмечалось выше, при плавлении деплетированной мантии мантийного клина экстракция летучего в расплавы не должна превышать той, которая существует при плавлении мантии в зонах срединно-океанических хребтов. Поэтому, вклад хлора мантийного клина в образование магм ОД+АКО или, что то же самое, континентальной коры за геологическую историю не может превысить его количества, которое выделилось бы при образовании эквивалентного объема океанической коры

из мантии СОХ. Этот вклад не должен превысить величины $0,31 \times 10^{22}$ г Cl (рис. 6). Выделилось же на порядок больше, а именно $3,14 \times 10^{22}$ г Cl. Избыток в количестве $2,83 \times 10^{22}$ г Cl, по-видимому, обеспечивался за счет дегидратации при плавлении пород субдуцированной плиты. Учитывая то, что масса хлора в последней составляет $4,85 \times 10^{22}$ г, можно заключить, что большая часть хлора перераспределяется в восходящие флюидные потоки, связанные с магматизмом краевых поясов.

Распределение хлора в условиях глубокого рециклинга. Сохранившаяся после субдукционной переработки часть хлора в количестве $2,02 \times 10^{22}$ г Cl в составе погружающейся плиты, увлекается в глубины мантии (поток III, рис. 5). По-видимому, этот хлор входит в рециклинг, охватывающий по крайней мере всю верхнюю мантию. Повышенные (по сравнению с расплавами океанических хребтов) содержания хлора в расплавах ОО и областей КР, вероятно, связаны с появлением этого рециклированного хлора в источниках внутриплитного магматизма. Это вполне согласуется с современными геодинамическими моделями, согласно которым источником мантийных магм океанических островов и внутриплитных континентальных областей является субдуцированная литосфера, обеспечивающая рециклинг вещества в геологических процессах [25].

Первичная экзосфера Земли. Оценим массу хлора, которая, по-видимому, существовала во внешней экзосфере ранней Земли. Для этого в соответствии со схемой баланса (рис. 1) выделим из общего количества хлора, участвующего в составе верхних оболочек, в том числе рециклированного, массу хлора ювенильного происхождения ($4,19 \times 10^{22}$ г), то есть, извлеченную магмами из мантийных источников. Масса хлора первичной экзосферы, таким образом, составляет около $2,23 \times 10^{22}$ г хлора. Это примерно равно массе хлора современной гидросферы ($2,7 \times 10^{22}$ г). Часть хлора первичной экзосферы возможно еще сохранилась в составе верхних оболочек Земли (около $0,21 \times 10^{22}$ г = $4,40_{\text{внешние оболочки}} - 4,19_{\text{ювенильных источников}}$), остальная часть была перераспределена во флюидные потоки надсубдукционных зон и во внутримантийный рециклинг.

В более ранней публикации [6] наличие хлора в первичной экзосфере нами не рассматривалось, так как различие между ювенильными, а также рециклированными и содержащимися в верхних оболочках массами хлора было оценено на уровне $\sim 5\%$, что в первом приближении позволило считать эти потоки сбалансированными. В настоящей работе, как уже отмечалось, в соответствии с данными [32] был более строго определен вклад магматизма разных геодинамических обстановок в формирование континентальной коры. Благодаря этому удалось показать, что разница между указанными выше массами была более значительная ($\sim 25\%$) и, соответственно, значительная часть хлора присутствовала в первичной экзосфере Земли.

Можно оценить, какой объем хлора был рециклирован разными геологическими процессами за геологическую историю. Как уже отмечалось,

содержание хлора в океанической коре (включая рециклированную) больше, чем было вынесено расплавами СОХ за всю историю Земли. Избыток $1,1 \times 10^{22}$ г Cl. Видимо, это то количество хлора, которое в результате преимущественно гидротермальных процессов дополнительно поступило в океаническую литосферу (поток **b** на рис. 4). Соизмеримый по масштабам поток рециклированного хлора действует на конвергентных границах плит (рис. 5), где за геологическую историю в верхние оболочки было возвращено из субдуцированной коры $2,83 \times 10^{22}$ г Cl (см выше). Наконец, довольно существенная часть хлора $2,02 \times 10^{22}$ г вовлекалась в более глубокий рециклинг, охватывающий практически всю подлитосферную мантию. Таким образом, всего за геологическую историю было рециклировано около $5,98 \times 10^{22}$ г хлора, что существенно превосходит его количество, содержащееся в земной коре и гидросфере.

Потоки фтора (рис. 7)

Данные о распределении фтора в во внешних оболочках Земли приведены в табл. 1. По сравнению с данными [20] в ней уточнены сведения о содержании фтора в породах континентальной коры по [2]. Всего за геологическую историю Земли из ее недр могло быть извлечено – $7,35 \times 10^{22}$ г фтора (табл. 1, схема баланса рис. 7). В то же время, в породах литосферной и гидросферной оболочек, включая их рециклированную часть, было накоплено не более $6,32 \times 10^{22}$ г фтора. Расхождение оценок выделившегося и накопившегося фтора составляет более 16%, при явном преобладании фтора первичных мантийных источников. Возможно, что это расхождение лежит в пределах ошибок определений средних содержаний фтора в породах и расплавах, однако, возможно также, что допущение о постоянстве этих содержаний на протяжении геологического времени нуждается в коррекции. Напомним, что наши оценки содержания летучих в магматических расплавах в основном базируются на данных по породам позднего фанерозоя, которые были распространены на всю геологическую историю. Возможно, что по отношению к фтору это допущение нуждается в коррекции, и поэтому можно предположить, что во времени количество фтора в магматических расплавах некоторых геодинамических обстановок могло изменяться. В этом случае ведущей причиной увеличения содержания фтора в магматических расплавах со временем могли стать процессы рециклинга.

Как следует из таблицы 1, средние содержания фтора в расплавах пород океанических плато и островов в четыре раза, а в расплавах пород континентальных рифтов в десять раз больше его содержания в расплавах базальтов срединно-океанических хребтов. В существующих геодинамических моделях формирование океанических островов и континентальных рифтов связывается с деятельностью мантийных плюмов, для состава которых характерна обогащенная мантия. Одним из важнейших источников такой мантии считается рециклированная литосфера, обогащен-

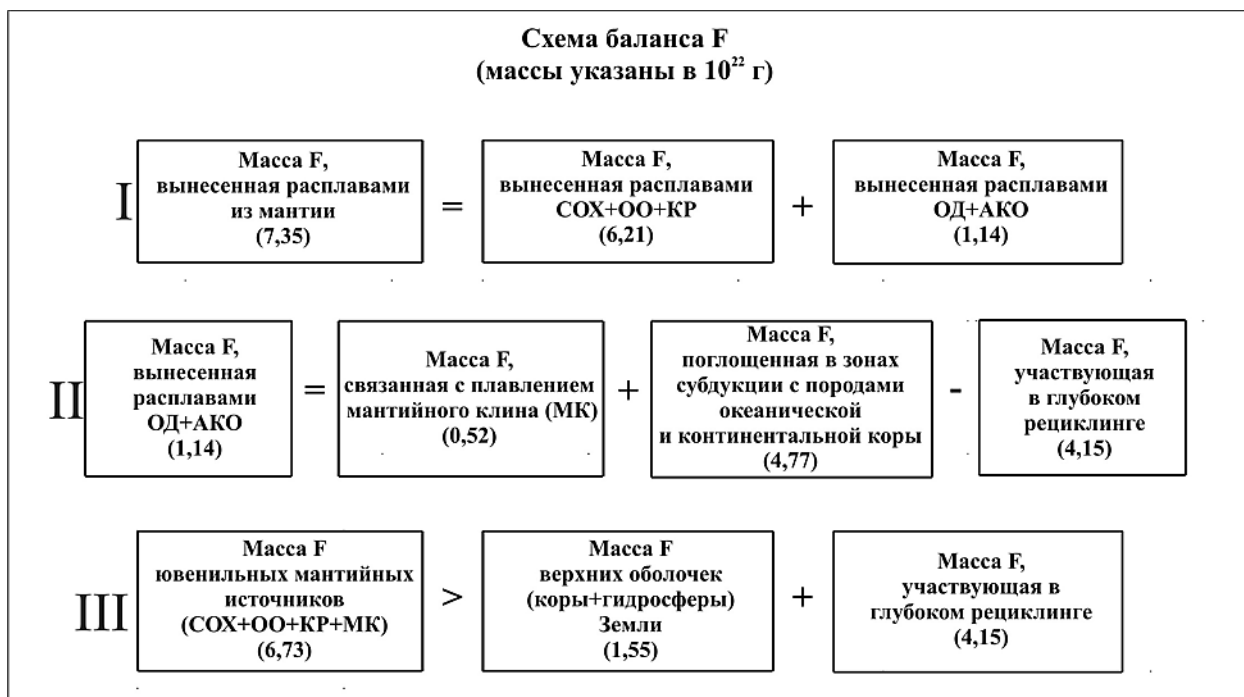


Рис.7. Схема баланса и распределения масс фтора в потоках летучих и в верхних геосферах Земли.

I – масса F, вынесенная расплавами СОХ+ОО+КР (на дивергентных границах литосферных плит и во внутриплитных областях) и расплавами ОД+АКО (на конвергентных границах литосферных плит); II – массы и источники F, вовлеченные в разнонаправленные потоки в обстановках конвергентных границ литосферных плит; III – баланс масс F, участвующих в потоках летучих между мантией и верхними оболочками Земли и содержащихся в породах коры и в гидросфере.

ная многими несовместимыми компонентами и, в частности, фтором, среднее содержание которого в рециклированной коре составляет 0,021 мас.% (см табл. 1). Поэтому, расплавы, образующиеся при плавлении такой рециклированной литосферы, даже в смеси с продуктами плавления днплетированной мантии могут быть обогащенными F. С этим замечанием согласуются данные по более высоким содержаниям фтора в расплавах, связанных с мантийными внутриплитными источниками (см. табл. 1, обстановки ОО и КР).

Обстановка СОХ. Появление ювенильного фтора в структурах литосферной оболочки Земли в первую очередь связано с магматическими извержениями в пределах срединно-океанических хребтов и образованием океанической коры. При формировании океанической коры за геологическую историю около $5,06 \times 10^{22}$ г фтора при среднем его содержании в расплавах ~0,023 мас.%. В породах океанической коры содержания фтора более низкие (0,019 мас.%), что указывает на его перераспределение из магматических центров СОХ в гидросферу и атмосферу в количестве около $0,88 \times 10^{22}$ г (поток а' на рис. 4). Содержание фтора в гидросфере на два порядка меньше, поэтому следует предполагать, что выделившийся из расплавов фтор был химически связан в породах континентальной коры.

Обстановка ОД+АКО. Содержание фтора в базальтовых расплавах островных дуг и активных окраин в три раза превосходит их содержание в аналогичных расплавах срединно-океанических хребтов (см. табл. 1, обстановки ОД+АКО). Поэтому такое его количество невозможно объяснить только за счет плавления вещества мантийного клина, который не может дать количества фтора больше, чем мантия срединно-океанических хребтов. Очевидно, что основной объем фтора в магмы ОД+АКО обеспечивается за счет его извлечения из пород субдуцированной литосферы.

В соответствии с данными табл.1 с породами субдуцированной коры (океанической и континентальной) поглощается – $4,77 \times 10^{22}$ г F. (поток I, рис. 5). В пределах зоны субдукции этот поток разделяется на нисходящую и восходящую ветви (рис. 5). Массу фтора, извлеченную из субдуцируемой литосферы с расплавами, оценим, как и раньше, на основании соотношения :

$F_{\text{ОД+АКО}} = F(\text{IIa+IIb}) + F(\text{IId})$, где поток F (II d) связан с плавлением мантийного клина.

Доля фтора мантийного клина F(II d), оцененная по его содержанию в продуктах плавления деплетированной мантии, определяется величиной $0,52 \times 10^{22}$ г. Следовательно, при плавлении субдуцированной литосферы в состав восходящего потока летучих дополнительно вводится около $0,62 \times 10^{22}$ г фтора ($F_{\text{ОД+АКО}} - F(\text{IId})$).

Поведение фтора в условиях глубокого рециклинга. После субдукционной переработки пород погружающейся плиты сохранившаяся в этих породах часть фтора ($4,15 \times 10^{22}$ г F) вовлекается в более глубокие горизонты мантии (поток III на рис. 5). По нашему мнению, этот рециклинг фтора в мантию обеспечивает его более высокие содержания в магматических расплавах, связанных с активностью плюмов.

Первичная экзосфера Земли Выше было отмечено преобладание ювенильного фтора над тем его количеством, которое содержится во всех оболочках Земли, включая их рециклированные массы. Этот дисбаланс не позволяет предполагать какое-либо заметное участие фтора в первичной экзосфере Земли.

Как один из вариантов объяснения установленного дисбаланса мы допускаем, что содержание фтора в расплавах некоторых геодинамических обстановок во времени могло изменяться. Вероятнее всего такие изменения можно предполагать для внутриплитных обстановок, источники которых, как показали изотопно-геохимические исследования [19], остаются изолированными от областей плавления на протяжении длительных интервалов времени (1 – 3 млрд. лет), и, соответственно, попадание обогащенного фтором рециклированного компонента в верхние геосферы могло быть существенно задержано по сравнению с другими его потоками. Поэтому, мы допускаем, что обогащение фтором внутриплитных расплавов могло произойти на последних этапах геологической истории, в связи с чем вклад пород внутриплитных обстановок в общий баланс фтора в

литосферной оболочке Земли мог оказаться более низким, чем расчетный. Предполагая, например, что изначально содержания фтора в расплавах ОО и КР были сопоставимы с его содержаниями в расплавах СОХ, то в этом случае вклад фтора всех магматических источников ($6,45 \times 10^{22}$ г) будет сбалансирован с его содержанием в коре и гидросфере.

Возможно еще одно решение проблемы. Так, если предположить, что рециклированный фтор полностью не концентрируется в субдуцированных породах, а частично перераспределяется в мантии, то тогда резонно ожидать, что в расплавах всех геодинамических обстановок, в том числе срединно-океанических хребтов, во времени его содержание должно нарастать. Установленные нами содержания фтора в расплавах, как отмечалось выше, характеризуют магмы преимущественно мезозоя и кайнозоя. Поэтому, в соответствии со сделанными допущениями, эти содержания должны рассматриваться как наиболее богатые, и поэтому распространять их на всю геологическую историю следует с выше упомянутыми поправками.

Потоки серы (рис. 8)

Сведения о распределении серы в расплавах и породах разных геодинамических обстановок приведены в табл. 1. По сравнению с данными [19, 33] внесено уточнение в среднее содержание серы в базальтах океанической коры. Выполненный нами анализ состава вулканических стекол показал, что в среднем в них сера содержится в количестве 0,107 мас%. Эта оценка близка к данным о содержании серы в породах океанического дна, полученным рядом исследователей (устное сообщение С.А.Силантьева) и к данным по закалочным стеклам СОХ [27]. Кроме того, она близка к содержанию серы в основных расплавах практически всех геодинамических обстановок, а также к ее содержанию в породах континентальной коры. Подобное постоянство содержания серы в мантийных расплавах и основных породах указывает на то, что она практически не фракционирует при кристаллизации расплавов и, следовательно, в породах океанической коры можно ожидать ее содержания, близкие к ее содержанию в расплавах и отмечаемые в закалочных стеклах базальтов СОХ.

Всего за геологическую историю магматическими расплавами из недр Земли было вынесено $27,13 \times 10^{22}$ г серы. Количество серы, которое имеется в породах континентальной и океанической коры, в том числе рециклированной за геологическую историю, оценивается в $26,04 \times 10^{22}$ г. Следовательно, можно говорить, что баланс серы между ее массами, вынесенными расплавами и законсервированными в породах разнотипной коры, в первом приближении соблюден. Из этого количества в современной коре и гидросфере находится около $3,21 \times 10^{22}$ г серы. Остальное ее количество ($\sim 22,83 \times 10^{22}$ г) участвует в процессах глубокого рециклинга.

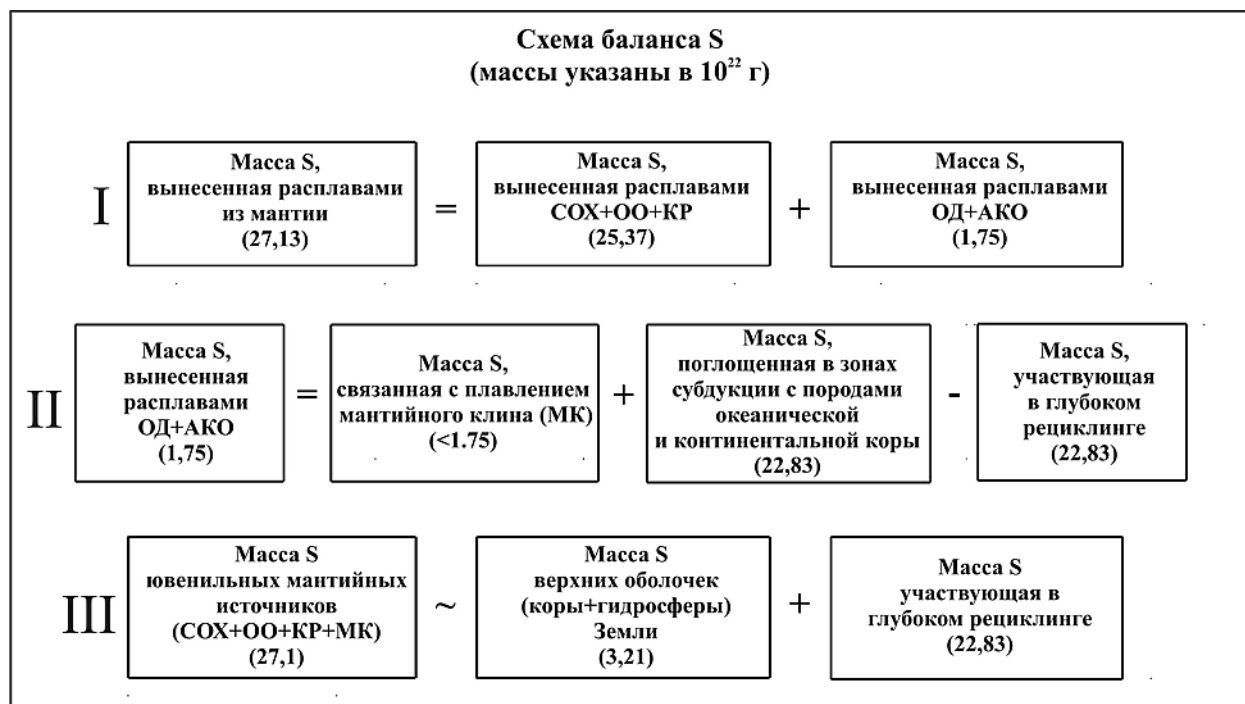


Рис.8. Схема баланса и распределения масс серы в потоках летучих и в верхних геосферах Земли.

I – масса S, вынесенная расплавами COX+OO+KP (на дивергентных границах литосферных плит и во внутриплитных областях) и расплавами OD+AKO (на конвергентных границах литосферных плит); II – массы и источники S, вовлеченные в разнонаправленные потоки в обстановках конвергентных границ литосферных плит; III – баланс масс S, участвующих в потоках летучих между мантией и верхними оболочками Земли и содержащихся в породах коры и в гидросфере.

Ранее нами было показано [6], что поведение серы в базитовых магмах различных геодинамических обстановок отличается от поведения воды, фтора и хлора. Так, в отличие от последних, которые в целом могут рассматриваться как несовместимые с мантией элементы, поведение серы имеет двойственный характер, что было показано по закономерностям ее распределения во фракционирующих базитовых магмах COX. При низких содержаниях воды (менее 0,4%) она, как и вода, ведет себя как крайне несовместимый к мантии элемент и накапливается в расплавах, а при содержании воды более 0,4% сера приобретает свойства совместимого элемента. Помимо этого, в окислительных условиях сера окисляется и переходит в форму сульфат-иона, имеющего сродство с водным флюидом и способного к улетучиванию из магм с флюидной фазой. Такие условия преобладают в обстановках активных окраин, где при магматической дифференциации остаточные расплавы обедняются серой, которая переходит в гидротермальные системы и в атмосферу, определяющие появление в этих обстановках многочисленных колчеданных и порфировых месторождений, а также месторождений самородной серы.

В целом, поведение серы в геологических процессах описывается следующим образом.

В обстановке СОХ с магмами за геологическую историю вынесено $24,42 \times 10^{22}$ г S. Она практически не перераспределяется в другие среды и сохраняется в породах океанической коры ($22,22 \times 10^{22}$ г).

Обстановка ОД+АКО. Масса серы, погребенной в зонах субдукции на конвергентных границах, оценивается в $22,83 \times 10^{22}$ г. В то же время, с расплавами здесь было вынесено $1,75 \times 10^{22}$ г S. Это меньше, чем вероятный вклад серы мантийного клина (*II_a* на рис.5), который в соответствии с ранее оговоренным методом расчета, мог достигать $2,48 \times 10^{22}$ г. Мы полагаем, что столь низкий вынос серы связан с повышенным содержанием воды в расплавах конвергентных границ, вследствие которого, как уже говорилось, сера начинает вести себя как совместимый элемент, и остается в рестите не только при плавлении мантийного клина, но и при плавлении субдуцированной коры. Поэтому, по сравнению с другими летучими сера в наименьшей степени подвержена перераспределению в обстановках конвергентных границ.

Поведение серы в условиях глубокого рециклинга. В магмах ОО и КР сера имеет содержания, пониженные относительно содержания в расплавах СОХ. Этот факт, на наш взгляд, также свидетельствует об участии рециклированной литосферы в формировании внутриплитных источников магматизма. Эти источники обогащены водой, что, как было отмечено выше, влияет на поведение серы и, в частности, определяет ее преимущественное сохранение в рестите при плавлении в мантии.

Обсуждение

Общие замечания. Основной идеей выполненных исследований стало представление о разнонаправленных потоках летучих, действующих в верхних оболочках Земли. Восходящий (ювенильный) поток отвечает выносу летучих из мантии совместно с магматическими расплавами, нисходящий связан с транспортом (рециклингом) литосферного материала в недра Земли в зонах субдукции. Как было показано, поведение рассмотренных летучих в этих потоках достаточно различно. Так, вода и хлор участвовали в составе первичной экзосферы Земли. Количество воды, вовлекавшейся в процессы рециклинга, превышает ее ювенильные поступления, поэтому в геологической истории ее содержание в верхних оболочках постепенно уменьшается. В отличие от нее содержание хлора и фтора постепенно увеличивалось в гидросфере и породах коры, за счет доминирования ювенильной составляющей над рециклинговой. Сера в рассмотренных процессах ведет себя преимущественно как совместимый с основными расплавами элемент и в основном не перераспределяется во внешние оболочки при излияниях, поэтому, ее содержание остается постоянным в расплавах разных геодинамических обстановок и в породах континентальной и океанической коры.

Представленные материалы несомненно свидетельствуют об участии летучих в процессах рециклинга. Наиболее эффектно они проявлены на конвергентных границах литосферных плит в обстановках АКО+ОД, расплавы которых резко обогащены H_2O , Cl, F по сравнению с расплавами срединно-океанических хребтов, что объясняется экстракцией части этих летучих из субдуцированной коры. С эффектом рециклирования связывается также обогащение водой, фтором и хлором расплавов, возникших в мантийных плюмах. В отличие от этих летучих сера весьма умеренно вовлекается в процессы рециклинга.

Здесь еще раз отметим, что предложенная модель баланса является первым приближением, поскольку пока еще отсутствуют систематические сведения, позволяющие количественно учесть изменение соотношений объемов магматизма разного состава и разных геодинамических обстановок в течение геологической истории Земли. Особенно проблематичным является вопрос о составе океанической коры в ранние лунную, нуклеарную и кратонную (архей – ранний протерозой) стадии эволюции Земли [7]. В раннем архее разные авторы предполагают [36] возникновение в качестве аналогов океанической коры коматиитовую кору, базитовую кору, возникшую при значительно большей длине глобальной системы СОХ или при большей скорости спрединга, а также различные варианты состава океанической коры с участием других пород. К сожалению, даже по известным составам магматических пород архея и протерозоя практически отсутствуют надежные данные по содержанию воды, хлора, фтора и серы в их магмах (например, по расплавленным включениям). В связи с этим предложенный в статье баланс летучих компонентов потребует уточнений по мере накопления данных по содержаниям этих компонентов в магмах ранних стадий геологической истории Земли.

Несмотря на сделанные в этой работе допущения, мы полагаем, что в принципиальном отношении предложенный подход, по-видимому, является более или менее верным. Критерием для такого заключения является соблюдение баланса между восходящими и нисходящими потоками, который был установлен для хлора, воды и серы, хотя посылки модели (средние содержания летучих в магмах и породах, а также представления о несущественном изменении во времени скорости корообразующих процессов при доминирующей роли тектоники литосферных плит) являлись независимыми между собой.

Рассмотрим некоторые следствия, которые вытекают из приведенных моделей баланса летучих в геодинамических процессах

Летучие и процессы рециклинга. Выполненные ранее исследования [3-6] показали, что в процессах магматической дифференциации и формирования коры вода, хлор и фтор ведут себя как несовместимые компоненты, накапливающиеся, в конечном счете, в атмосфере, гидросфере и продуктах наиболее глубокой дифференциации магматических расплавов. В

то же время, одним из важных следствий рассмотренных балансов стал вывод об участии летучих в разнообразных процессах рециклинга, то есть в процессах их перехода из атмосферы и гидросферы в породы коры и совместно с последними - возвращению в мантию. Процессы рециклинга начинают действовать уже в обстановке СОХ при гидратации новообразованных пород коры и их обогащении по сравнению с расплавами водой и хлором.

Наиболее эффективно процессы рециклинга проявились на конвергентных границах плит. Магмы этих обстановок по сравнению с продуктами плавления деплетированной мантии в СОХ обогащены водой в 5, хлором в 10 и фтором в 2 раза. По сравнению с породами коры они богаче водой и хлором более чем в два раза. Поэтому, более половины массы этих летучих, вынесенных на конвергентных границах литосферных плит, было возвращено в гидросферу и атмосферу. Избыточное содержание летучих в магмах ОД+АКО по сравнению с магмами СОХ может быть связано только с участием в процессах плавления субдуцированной плиты, обогащенной этими компонентами. На долю этой воды приходится более 80% общей массы воды, задействованной в магматизме ОД+АКО. Отметим также, что с расплавами на поверхность Земли на конвергентных границах перераспределяется около 65% всего рециклированного хлора и около 25% фтора. Зоны островодужного и окраинно-континентального магматизма являются наиболее распространенными структурами земной коры, что позволяет утверждать ведущую роль субдукции в процессах рециклинга в геологической истории.

После переработки литосферы в зонах субдукции сохранившиеся в ней летучие вовлекаются в глубокий рециклинг. По имеющимся геодинамическим моделям с рециклированной литосферой связывается появление мантийных источников, питающих магматизм внутриплитных обстановок – океанических островов и лавовых плато, континентальных рифтов и областей, возникших над горячими точками мантии. Нами также получены данные об обогащении магм этих геодинамических обстановок водой, фтором и хлором, что хорошо укладывается в эти модельные представления. Как установлено последними сейсмотомографическими работами, области зарождения мантийных плюмов по глубине распределены неравномерно. На это особое внимание обращает Ю.М. Пушаровский [15], отметивший их приуроченность к выделенным им внутримантийным сейсмотектоническим разделам [16], вдоль которых, в частности, распределяется субдуцированный материал при своем погружении в мантию. Необходимо напомнить, что природа плюмов трактуется, по меньшей мере, двояко. С одной стороны, считается, что они имеют термальную природу, с другой, что они связаны с вещественной и, следовательно, плотностной неоднородностью мантии. Наши данные, свидетельствующие об обогащении расплавов в обстановках ОО и КР водой, хлором и фтором, показывают

наряду с другими геохимическими характеристиками, что мантийные плюмы, несомненно, имеют определенные вещественные отличия от состава обычной мантии. Поэтому, подъем плюмов к поверхности мог определяться не только термальными и глубинными тектоническими движениями, но и плотностными отличиями его материала от окружающей мантии, в том числе за счет участия в его составе летучих компонентов, тогда как распределение очагов их зарождения могло определяться уровнями захоронения литосферы (или сейсмотомаграфическими границами). На возможность глубинного рециклинга летучих влияет скорость субдукции. При высоких скоростях субдукции более низкотемпературные части субдуцируемых плит погружаются на большие глубины, сохраняя в силу более низких температур (при данном давлении) летучие компоненты [34]. Если высокие скорости спрединга и субдукции были характерны для ранних этапов истории Земли, то можно предполагать появление главных мантийных неоднородностей, являющихся источником плюмов, именно в это время.

Состав и масштабы первичной экзосферы Земли. Выполненные балансовые построения приводят нас к выводу о необходимости признания мощной газовой экзосферы у Земли, начиная с самых ранних стадий ее развития. Особый интерес в свете такого вывода приобретает схема баланса воды. Наиболее интригующим в этой схеме является то, что в зонах субдукции поглощается воды больше, чем ее выносятся с расплавами всех геодинамических обстановок, и, тем не менее, на поверхности Земли сохраняется гигантский резервуар воды. Отметим, что идея о поглощении морской воды в мантии высказывалась и раньше [9, 24, 25, 31], но относительно надежно обосновать ее фактическим материалом в масштабе геологической истории удалось только в результате выполненного нами анализа.

В проблеме кажущегося несбалансированного распределения воды между геосферами возможны два варианта решения. Так, можно предположить, что на самых ранних стадиях своего развития Земля была лишена какой-либо атмосферы. В этом случае следует принять, что в дофанерозойское время, для которого пока еще имеется мало данных, интенсивность выделения воды из расплавов была существенно более высокой, чем сейчас (то есть, расплавы были более водонасыщенные), а содержание воды в породах субдуцированной коры, напротив, было более низким. Эти допущения не имеют под собой какого-либо основания, так как основные (мантийные) породы с характеристиками формирования из водонасыщенных расплавов (в первую очередь, амфибол-содержащие базальты) в докембрийских комплексах распространены не шире, чем в более молодых образованиях. Ничего не изменяют, например, и предположения о более высоких скоростях спрединга и субдукции на ранних стадиях развития Земли, так как в этом случае наряду с ростом вклада в общий баланс ювенильной составляющей еще в большей степени возрастает доля

субдуцированной воды (и, кстати, хлора), что только увеличит избыток этих компонентов в схеме баланса.

Второй вариант предполагает наличие у Земли с самых ранних стадий ее существования мощной экзосферы. В соответствии с предложенной моделью баланса состав этой экзосферы определяли в основном вода и хлор в соотношении 100:1 (в современном океане ~ 100:2), тогда как сера и фтор, по-видимому, не играли заметной роли. Масса воды в первичной экзосфере ранней Земли оценивается в $231,9 \times 10^{22}$ г, (рис. 3). Это более чем в полтора раза больше массы современного океана. При конденсации такой атмосферы должен был возникнуть океан со средней глубиной около 4 км. В судьбе этого океана решающую роль, по-видимому, сыграли процессы субдукции. За геологическую историю через зоны субдукции было поглощено в недрах Земли такое количество воды, которое сопоставимо с ее содержанием во всех современных внешних оболочках, включая гидросферу. Даже с учетом появления в общем балансе воды довольно значительного количества ювенильного компонента, средняя современная глубина океана сократилась практически в полтора раза и оценивается примерно в 2,7 км. Образно говоря, через зоны субдукции Земля «выпивает» свою гидросферу, вследствие чего происходит «обводнение» ее мантии. Заметим, что допущение более высоких скоростей спрединга и субдукции на ранних этапах развития Земли приводит к выводу о существенно более значительном содержании воды в первичной экзосфере и, соответственно, о более значительном ее перераспределении в мантию планеты.

Летучие и их возможная роль в геодинамике планет земной группы.

Как нам представляется, участие водной среды, как самостоятельной оболочки в геологических процессах, определило ряд важных отличий Земли от других планет земной группы. Так, ни на одной из этих планет не обнаружено следов тектоники литосферных плит. Более того, они давно прошли пик своей геологической активности. Мы допускаем, что причиной иной тектонической истории развития Земли стало именно наличие мощной водной атмосферы и ее активное участие в процессах рециклинга, особенно на конвергентных границах плит. Магматизм этих обстановок, сыгравший решающую роль в формировании и преобразовании земной коры, характеризуется высокой дифференцированностью при преобладании среди его продуктов средних и кислых пород (андезитов, дацитов, риолитов и, особенно, гранитоидов) и высокой степенью насыщения расплавов водой, возрастающей по мере повышения их кремнекислотности. Благодаря участию воды температурный интервал формирования расплавов резко смещен в сторону более низких температур. Но эти расплавы, также как и участки их выплавления служат своеобразным «смазочным» материалом на границах субдуцируемых плит. По-видимому, можно сказать, что без участия воды в зонах конвергенции процессы субдукции, скорее всего, должны были бы прекращаться в результате заклинивания погружающейся плиты.

Косвенным подтверждением этого заключения является отсутствие в строении Марса и Венеры, лишенных водной атмосферы, структур, эквивалентных зонам конвергенции, и, в частности, типичного для этих зон гранитоидного магматизма. Мы полагаем, что именно поступление воды в недра на конвергентных границах литосферных плит могло стать тем решающим фактором, который поддерживал субдукцию на протяжении Земной истории.

По-видимому, с процессами глубинного рециклинга летучих можно в известной степени связать и глубинную геодинамику Земли. Постепенное обогащение водой мантии могло привести к снижению температур ее плавления и, как следствие, могло стать причиной смены во времени более высокотемпературного коматиитового магматизма толеитовым. Это в свою очередь должно было повлечь за собой продление магматической эволюции нашей планеты. Наконец, если зарождение и динамика плюмов регулируется не только термальными процессами, но и химической неоднородностью мантии, то процессы рециклинга и, в частности, рециклинга летучих могли сыграть ключевую роль в поддержании плюмовой активности Земли.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 02-05-64191, 02-05-64196, 02-05-64518), Программы Научные школы, грант НШ-1145.2003.5, ФЦНТП - проект 1.2 «Катастрофические процессы» («Глобальные изменения природной среды и климата»), Программы №5 ОНЗ РАН.

Литература

- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.** Глубинная геодинамика. Новосибирск. Изд-во СО РАН, филиал ГЕОС. 2001. 407 с.
- Иванов В.В.** Комплексный геоэкологический подход к снижению противостояние человека и природы. М. Изд-во ИМГРЭ, 2003, 61 с.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В и др.** Роль магматизма в концентрации воды во внешних оболочках Земли. В кн.: Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ. 1998. С. 117-126.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А.** Летучие компоненты (H₂O, CO₂, Cl, F, S) в базитовых магмах различных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол // Петрология. 2000. № 2. С. 131-164.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А.** Летучие компоненты (H₂O, CO₂, Cl, F, S) в магмах среднего и кислого составов различных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол // Петрология. 2000. № 6. С. 585-617.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А., Мигдисов А.А.** Баланс воды и хлора между мантией и внешними оболочками Земли // Геохимия. 2002. № 10. С. 1041-1070.
- Магматические горные породы.** Эволюция магматизма в истории Земли. Ред. В.И.Коваленко. М.: Наука. 1987. 439 с.
- Мигдисов А.А., Бреданова Н.В., Ярошевский А.А.** Новые данные по распространенности элементов в осадочной оболочке. 2002 (в печати).
- Монин А.С.** История Земли. Л.: Наука, 1977. 288 с.

- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А.** Концентрация фтора в магматических расплавах по данным изучения включений в минералах // *Геохимия*. 1998. № 2. С. 147-157.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Иваницкий О.М.** Концентрация летучих компонентов (H₂O, Cl, S, CO₂) в магматических расплавах по данным изучения включений в минералах // *Доклады РАН*. 1996. Т. 347. № 3. С. 391-393.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Иваницкий О.М., Савельева Н.И.** Концентрация хлора в магматических расплавах по данным изучения включений в минералах // *Геохимия*. 1995. № 6. С. 798-808.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А.** Концентрация летучих компонентов (H₂O, Cl, F, S, CO₂) в магматических расплавах различных геодинамических обстановок // *Геохимия*. 2000. № 5. С. 555-564.
- Пуцаровский Ю.М.** Некоторые современные проблемы тектоники Земли // *Геотектоника*. 2004.(в печати)
- Пуцаровский Ю.М.** Линейность и нелинейность в геологии // *Геотектоника*. 1999. №3. с.42-49
- Пуцаровский Ю.М., Пуцаровский Д.Ю.** Геосферы мантии Земли// *Геотектоника*. 1999. №1. с.3-14
- Ронов А.Б.** Стратисфера или осадочная оболочка Земли (количественное исследование). М.: Наука. 1993. 144 с.
- Ронов А.Б., Мигдисов А.А.** Количественные закономерности строения и состава осадочных толщ Восточно-Европейской платформы и Русской плиты и их место в ряду древних платформ мира // *Литология и полезные ископаемые*. 1996. № 5. С. 451-475.
- Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А.** Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука. 1990. 183 с.
- Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И.** Источники внутриплитного магматизма Западного Забайкалья в позднем мезозое-кайнозое (на основе геохимических и изотопных данных) // *Петрология*. 1998. Т.6. № 2. С.115-139.
- Aggrey K.E., Muenow D.W., Batiza R.** Volatile abundances in basaltic glasses from seamounts flanking the East Pacific Rise at 21° N and 12-14° N // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1988. V. 52. № 8. P. 2115-2119.
- Condie K.C.** Plate tectonics and crustal evolution. 4th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann. 1997, 282p.
- Davies J.H., Stevenson D.J.** Physical model of source region of subduction zone volcanics // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № B2. P. 2037-2070.
- Dickinson W.R., Luth W.C.** A model for plate tectonic evolution of mantle layers. // *Science*. 1971. V. 174. P. 400-404.
- Fyfe W.S.** The evolution of the earth's crust: modern plate tectonics to ancient hot spot tectonics? // *Chem. Geol.* 1978. V. 23. P. 89-114.
- Hofmann A.W.** Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. // *Nature*. 1997. V. 385. P. 219-229.
- Jambon A.** Earth degassing and large-scale geochemical cycling of volatile elements // Carroll M.R. and Holloway J.R., eds. *Volatiles in magmas*. *Rev. Mineral.* 1994. V. 30. P. 480-517.
- Maruyama S.** Plume tectonics. // *Journ.Geol.Soc.Japan*. 1994. V.100. N1. P.24-49.
- Michael P.** Regionally distinctive sources of depleted MORB: Evidence from trace elements and H₂O // *Earth Planetary Sci. Lett.* 1995. V. 131. P. 301-320.

Michael P.J., Schilling J-G. Chlorine in mid-ocean ridge magmas: Evidence for assimilation of seawater-influenced components // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1989. V. 53. P. 3131-3143.

Peacock S.M. Fluid processes in subduction zones. // *Science.* 1990. V. 248. P. 329-337.

Reymer A., Schubert G. Phanerozoic addition rates to the continental crust and crustal growth. // *Tectonics.* 1984. V. 3. P. 63-77.

Ronov A.B., Jaroshevsky A.A., Migdisov A.A. Chemical structure of the Earth's crust and major element geochemical balance // *International Geological Reviews.* 1991. № 10. P 941-1031. № 11. P.1032-1085.

Staudigel H., King S.D. Ultrafast subduction: the key to slab recycling efficiency and mantle differentiation?// *EPSL.* 1992. V.109. p.517-530.

Volatiles in magmas. Carroll M.R. and Holloway J.R., eds.// *Rev. Mineral.* 1994. V. 30. 550 p.

Windley B.F. *The evolving continents.* 1995. John Wiley a. Sons. Chichester-New York-Brisbane-Toronto-Singapore. 526 pp.