

## Глава 4

# О ВЛИЯНИИ ПРОЦЕССОВ ВНЕШНЕЙ ГЕОДИНАМИКИ НА ОСТРОВОДУЖНЫЙ МАГМАТИЗМ

---

В этой главе будут рассмотрены возможные связи между процессами, относящимися, по сути, к процессам внешней геодинамики, и проявлениями островодужного магматизма. Здесь будет акцентировано внимание на двух таких процессах. Первый из них - гидратация океанской литосферы водами Мирового океана. Второй – глобальные гляциоэвстатические колебания уровня Мирового океана. Оба эти процесса обусловлены существованием на поверхности Земли гидросферы. Т.е. по сути, речь идет о влиянии гидросферы на геологические процессы, определяющие характер проявления островодужного магматизма. Этим вопросам посвящены работы (Селиверстов 2001а,б; 2003; 2004).

### 4.1. ГИДРОКОНВЕКЦИОННАЯ ГИПОТЕЗА ОСТРОВОДУЖНОГО МАГМАТИЗМА

Еще до разработки тектоники литосферных плит в 1960 г. Котсом было предложено два возможных механизма магнообразования для Алеутской островной дуги, принятых позднее для зон субдукции (Кеннет, 1987): во-первых - плавление гидратированных пород пододвигаемой океанической коры при достижении зоны высоких температур, во-вторых – образование магмы из пород мантийного клина, вследствие снижения температуры их плавления под воздействием водного флюида, мигрирующего вверх из погружающейся плиты. До настоящего времени в тектонике плит не предложено других, принципиально новых механизмов. В обоих механизмах первостепенная роль в процессе магнообразования отводится водному флюиду, выделяющемуся при дегидратации погружающейся литосферной плиты.

#### 4.1.1. Гидроконвекционные магматические системы

В предыдущих разделах было показано, что с учетом региональных особенностей геологического строения прикамчатского сектора Тихоокеанской плиты следует ожидать существенного различия в содержании связанной воды в его северном и южном литосферных блоках. Учитывая первостепенную роль воды в процессе генерации островодужных магм, указанное различие должно заметно отразиться не только на геометрии и структуре сейсмофокальной зоны, но и на проявлениях островодужного магматизма.

Действительно, зона современного вулканизма на севере Камчатки заметно отличается от Восточного вулканического пояса и юга Камчатки не только большей удалённостью от глубоководного желоба, но и по ряду других геоморфологических, геофизических и петролого-геохимических признаков. Здесь мы акцентируем внимание лишь на двух из них. Во-первых, вулканы Северной группы резко отличаются своими гигантскими размерами и исключительно высокой активностью. Поперечные размеры основания этих вулканов достигают первых десятков километров. Здесь находятся вулканические постройки с максимальными для Курило-Камчатской дуги абсолютными отметками: Ключевской – 4750 м, Камень – 4585 м, Плоская Ближняя – 4108 м, Плоская Дальняя – 3943 м и др. Для сравнения заметим, что абсолютные отметки большинства вулканов Восточного пояса и юга Камчатки находятся в пределах 1000-2500 м, а размеры основания редко превышают 10 км. Во-вторых, на северном участке дуги отсутствуют гигантские кальдеры (до нескольких километров в поперечнике), в то время как в пределах Восточного вулканического пояса и юга Камчатки такие кальдеры широко распространены. Какова же возможная связь этих аномальных отклонений на северном участке дуги со степенью глубинной гидратации океанской литосферы?

В отношении размеров вулканов такая связь становится понятной на качественном уровне, если допустить, что содержание воды, растворённой в глубинных (астеносферных) магматических очагах и нижних частях магматических колонн, имеет прямую зависимость от

количества водного флюида, поступающего в зону магмообразования при дегидратации погружающейся литосферной плиты, или, в конечном счете - от степени гидратации этой плиты. Действительно, если зона глубинной гидратации в северном литосферном блоке по сравнению с южным отличается более высоким (в 2 раза) содержанием связанной воды, то глубинные магматические очаги и нижние участки магматических колонн под Северной группой вулканов, в отличие от вулканов Восточного пояса и юга Камчатки, содержат заметно больше растворённой воды и, соответственно, отличаются меньшей плотностью. Вследствие этого, компенсация литостатического давления на северном участке дуги достигается при значительно большей высоте магматической колонны, что, вероятно, и является главной причиной гигантских размеров вулканов Северной группы и колоссальных масштабов проявления их вулканической активности. Каковы же возможные значения содержания водного флюида в островодужных магмах на больших глубинах?

Известно (*Барбанов, 1985*), что предельное содержание воды, растворённой в магме при поверхностных условиях, крайне незначительно (доли процента). Однако с ростом глубины и давления картина существенно меняется. На глубинах порядка 30 км и температурах 1100-1200<sup>o</sup>C насыщение андезитовых и базальтовых магм достигается уже при содержании воды более 10 массовых %, и с дальнейшим увеличением глубины эта тенденция сохраняется.

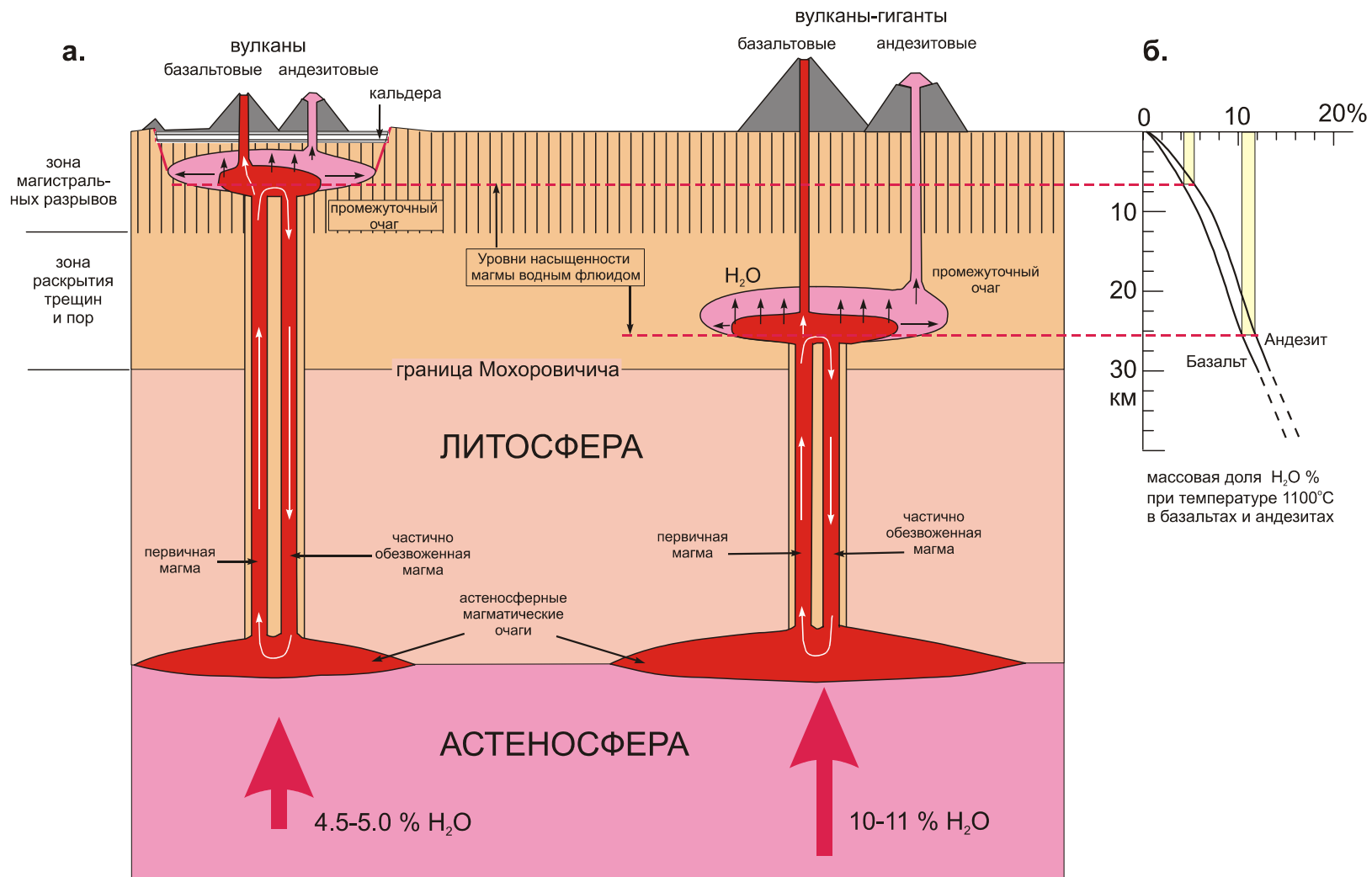
Согласно экспериментальным данным, с ростом давления возрастает также растворимость порообразующих минералов в водном флюиде, которая, при мантийных параметрах, приближается к растворимости легкорастворимых солей в комнатных условиях. При этом ожидается, что на глубинах 100-120 км (давление 30-40 · 10<sup>8</sup> Па) будет иметь место постепенный переход между водно-силикатными флюидами и гидратированными силикатными расплавами (*Рябчиков, 1982*). Возможно, что зона островодужного магмообразования и есть та область, где исчезает грань между водно-силикатным раствором и магматическим расплавом, и водный флюид, высвобождающийся при дегидратации погружающейся литосферной плиты, способен превращаться в магматический расплав при растворении достаточно большого количества минералов из погружающейся плиты, астеносферы и мантийных пород нависающей литосферной плиты.

На рис. 4.1 (а,б) представлена принципиальная схема проявлений островодужного магматизма, отражающая сущность представляемой гидроконвекционной гипотезы.

Образовавшийся в процессе дегидратации погружающейся литосферной плиты магматический раствор-расплав поднимается к подошве нависающей литосферной плиты и накапливается в глубинных астеносферных очагах. Его дальнейшее продвижение вверх связано с проработкой канала в литосфере. По-видимому, этот процесс обусловлен, в основном, частичным плавлением и растворением вмещающих пород над астеносферным очагом восходящими высокотемпературными потоками магмы (магматического раствора-расплава). Обогащаясь растворенными силикатами и минеральными включениями, магма становится более плотной и опускается в нижнюю часть астеносферного очага, уступая место свежим порциям более разуплотненной и горячей магмы. Таким образом, уже на стадии проработки магматического канала закладывается конвекционная магматическая система.

При восходящем движении магмы по проработанному каналу снижается ее давление и, соответственно, уменьшается растворимость воды в магме. В процессе подъема магма достигает «критической» глубины, начиная с которой растворенный в магме водный флюид начинает выделяться в виде свободной фазы. Отделившийся водный флюид благодаря высокой температуре активно взаимодействует с вмещающими горными породами и способствует развитию промежуточных магматических камер или промежуточных очагов. При этом за счет процессов плавления (растворения) и ассимиляции вмещающих пород, в пределах промежуточного очага может возникать зональность по составу магм: от первичных базальтов до андезитов и дацитов.

При частичном обезвоживании плотность магмы увеличивается и создаются условия для её конвекции, т.е. условия для проявления нисходящих движений частично обезвоженной магмы и замкнутой магматической циркуляции между астеносферными и промежуточными магматическими очагами (рис.4.1а). Такая гидроконвекционная магматическая система является, прежде всего, эффективным механизмом интенсивного переноса воды и тепла из астеносферы на «промежуточные» глубины, обуславливая развитие зон регионального метаморфизма и высокотемпературных гидротермальных систем.



**Рис. 4.1.** Принципиальная схема проявлений островодужного магматизма при различном содержании растворённой воды в магме (а) и диаграмма растворимости воды в андезитовой и базальтовой магме (б) по данным (Барабанов, 1985).

Благодаря постоянному притоку тепла и свежей магмы, промежуточные очаги таких магматических (гидромагматических) систем не «замерзают» и способны длительное время поддерживать активность связанных с ними вулканических центров и гидротермальных систем. При этом важно отметить, что для устойчивого функционирования такой магматической системы вовсе не требуется выход магмы на поверхность Земли, т.е. она способна существовать независимо от проявлений вулканизма. Поэтому вполне возможно длительное существование «слепых» магматических систем, без проявлений вулканической активности, а также существование активных магматических систем под «потухшими» вулканами. Вулканическая активность над такими системами может впервые проявиться или возобновиться после длительного перерыва, вследствие, например, локальных изменений тектонических условий в земной коре или других факторов. Отсюда следует весьма важный в практическом отношении вывод: при районировании вулканической опасности следует принимать во внимание не только действующие вулканы, но и активные магматические системы, над которыми действующие вулканы отсутствуют.

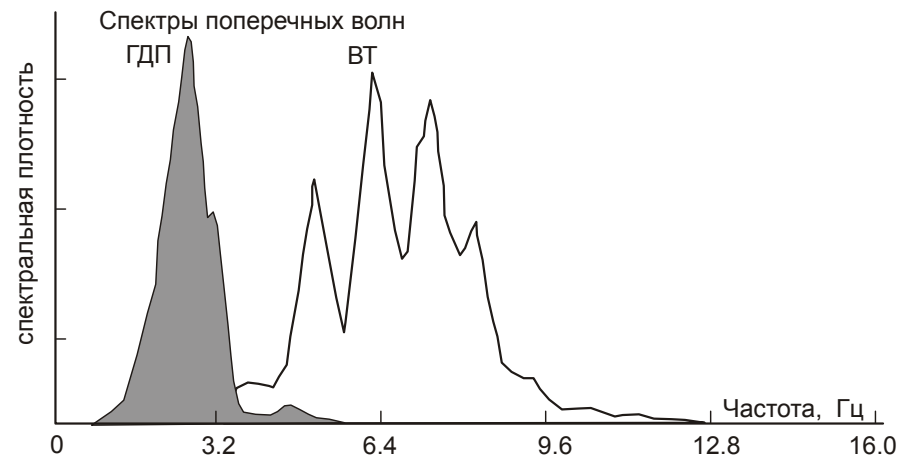
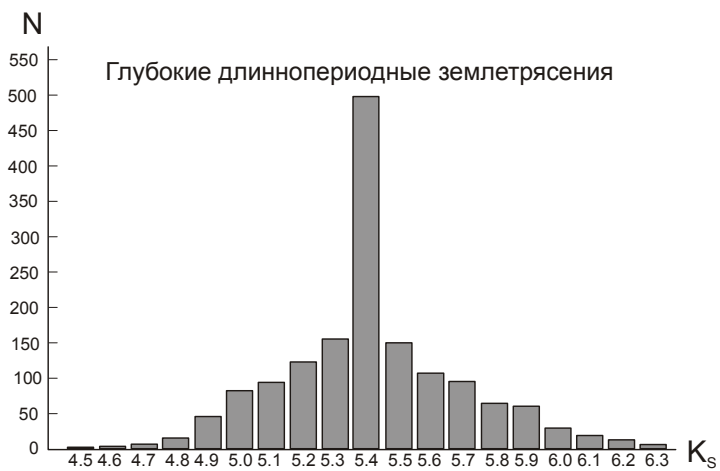
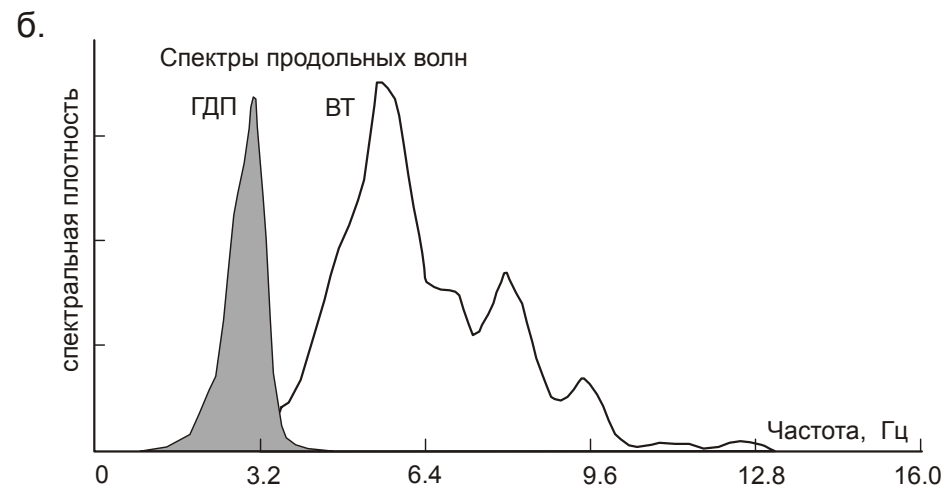
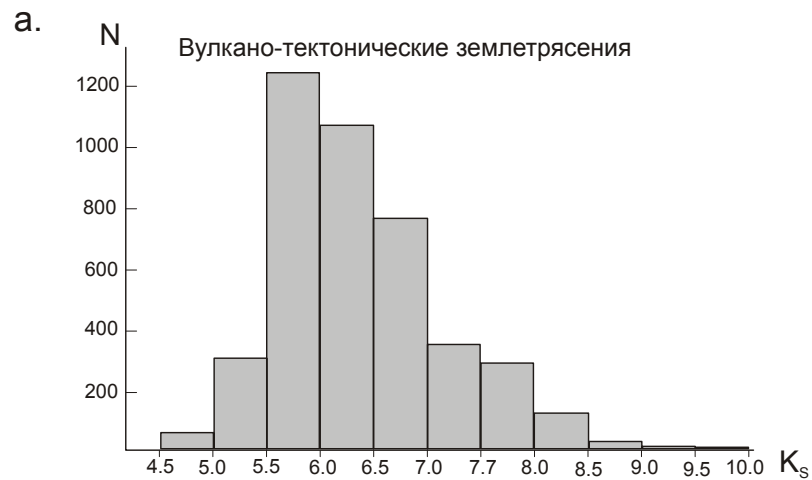
Глубина возникновения промежуточных очагов соответствует глубине начала отделения свободной водно-флюидной фазы, т.е. определяется Р-Т условиями насыщения магмы растворённой водой и связана прямой зависимостью с содержанием растворённой в магме воды (рис.4.1б). Так, при 10% -ном содержании воды и температуре 1100°C андезитобазальтовые магмы выделяют свободный водный флюид начиная с глубин около 25 км, а при содержании 3% - с глубин менее 5 км. Отсюда следует, что глубина промежуточных очагов в островных дугах зависит от степени насыщенности «первичной» магмы водным флюидом, т.е. в конечном счете, определяется степенью гидратации погружающейся под островную дугу океанской литосферной плиты.

В этом выводе, в частности, содержится ответ на вопрос: почему на северном участке Курило-Камчатской дуги при гигантских размерах вулканических построек практически отсутствуют крупные кальдеры? Действительно, в глубинных магматических очагах под северным участком Курило-Камчатской дуги предполагается относительно высокое содержание растворённой воды и, соответственно, более значительные глубины промежуточных очагов, исключаящие, возможность проявления кальдерообразующих движений.

#### **4.1.2. О возможной природе глубоких длиннопериодных землетрясений и вулканического дрожания**

Процесс выделения из магмы растворённого водного флюида в свободную фазу сопровождается увеличением суммарного объема флюида и магмы, по сравнению с исходным расплавом, т.е. требует затрат энергии. Такого рода процессы проявляются дискретно. Они начинаются лишь после некоторого превышения «критических» параметров, т.е. в условиях пересыщенного раствора, и развиваются лавинообразно, приводя практически к мгновенному выделению в свободную фазу излишков растворённого флюида во всей массе пересыщенного раствора. Быстрое, лавинообразное выделение водного флюида в свободную фазу и соответствующее дискретное увеличение объёма являются, вероятно, причиной вулканических землетрясений определенного типа: механизмы таких землетрясений соответствуют источникам дилатации в магматическом расплаве. В связи с этим, можно полагать, что зона промежуточного очага, где происходит отделение основных объемов водно-флюидной фазы, является сейсмически активной. При этом сейсмическая активность в зоне промежуточного очага (частота сейсмических событий) определяется интенсивностью выноса растворённого флюида восходящим потоком магмы, т.е. является показателем интенсивности циркуляции магмы в гидроконвекционной магматической системе, а сами землетрясения в силу своей природы имеют существенные отличия по динамическим характеристикам от тектонических и вулкано-тектонических землетрясений.

По-видимому, именно такая сейсмически активная зона существует под Ключевским вулканом на глубине 25-30 км. Эта зона является источником так называемых глубоких длиннопериодных (ГДП) землетрясений, отличающихся по ряду признаков от тектонических и вулкано-тектонических землетрясений (*Горельчик, Сторчеус, 2001; Горельчик и др., 2004*). Сравнительные характеристики вулкано-тектонических и глубоких длиннопериодных землетрясений, заимствованные из работы (*Горельчик и др., 2004*), приведены на рис.4.2.



**Рис. 4.2.** Распределение по энергетическим классам (а) и спектральный состав (б) вулкано-тектонических (ВТ) и глубоких длиннопериодных (ГДП) землетрясений под Ключевским вулканом по данным (Горельчик и др., 2004).

Спектральный состав глубоких длиннопериодных землетрясений смещен в сторону низких частот (0.5 - 5 Гц), по сравнению со спектром обычных вулcano-тектонических землетрясений соответствующих энергетических классов (1 – 15 Гц). Энергетический класс ГДП-землетрясений заключен в сравнительно узком диапазоне ( $K_S = 5.0-5.7$ ). Характерной чертой ГДП-землетрясений является также подобие формы записи индивидуальных сигналов, составляющих серии и рои, что свидетельствует о неоднократном возбуждении стационарного источника при неструктивном процессе. При этом наблюдается сходство пространственных, временных и спектральных характеристик ГДП-землетрясений и вулканического дрожания.

А.В. Сторчеусом рассмотрены возможные механизмы ГДП-землетрясений (*Горельчик, Сторчеус, 2001; Горельчик и др., 2004*) и сделан вывод о том, что данный тип землетрясений, вероятнее всего, действительно связан с переходом в свободную фазу растворенных в магме летучих, прежде всего – растворенной в магме воды, что и предполагается в рамках рассматриваемой гидроконвекционной гипотезы. Отмеченную в указанных выше работах идентичность спектрального состава Р и S фаз ГДП-землетрясений можно рассматривать как указание на обменную природу S-фазы, ее генерацию при наклонном падении Р-волны на резкую границу раздела магматический расплав - горная порода.

Движение насыщенной водным флюидом магмы из промежуточного очага к поверхности в процессе извержения сопровождается отделением свободной флюидной фазы практически по всей высоте магматической колонны, находящейся над промежуточным очагом, т.е. вся многокилометровая магматическая колонна в этом случае может являться источником многочисленных сейсмических событий с динамическими характеристиками ГДП-землетрясений. По-видимому, суперпозиция этих событий является важной составной частью сейсмического процесса, которое соответствует понятию «вулканическое дрожание». Отмеченное выше сходство пространственных, временных и спектральных характеристик ГДП-землетрясений и вулканического дрожания подтверждают эту точку зрения.

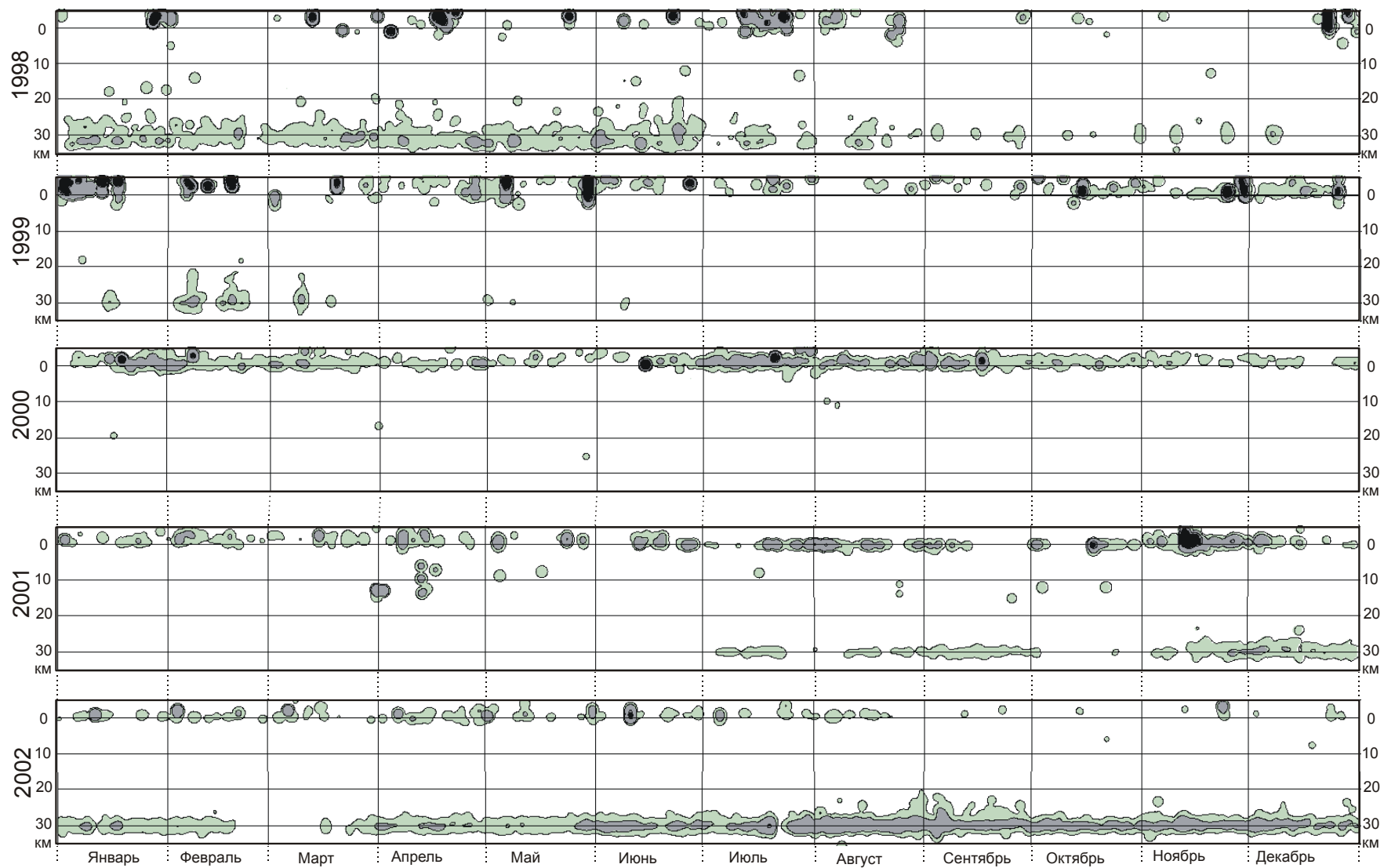
#### **4.1.3. О некоторых закономерностях проявления сейсмической активности под Ключевским вулканом**

Благодаря развитию локальной сети сейсмологических наблюдений Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) в районе Ключевской группы вулканов, значительно повысилась ее информативность. В последнее 10-12 лет стало возможным определять гипоцентры и динамические характеристики даже сравнительно слабых (с  $K_S$  порядка 4) вулканических землетрясений практически без пропусков и с достаточно высокой точностью.

Ключевской вулкан поистине является уникальным объектом для изучения закономерных связей сейсмичности и вулканизма. Именно благодаря уникально-высокой его активности за это, сравнительно короткое время был получен богатый и представительный фактический материал по слабым вулканическим землетрясениям, в том числе по рассмотренным выше ГДП-землетрясениям.

На рис.4.3–4.4 представлены временные диаграммы плотности распределения энергии землетрясений непосредственно под постройкой Ключевского вулкана в контуре, радиусом около 6 км от его вершины, за последние 10 лет (1998-2007 гг.). Диаграммы построены с использованием каталога землетрясений (КФ ГС РАН) по Ключевской группе вулканов за указанный период времени, с применением ГИС-технологий. На диаграммы нанесены также сведения о проявлениях вулканической активности Ключевского вулкана по визуальным наблюдениям.

На представленных диаграммах отчетливо выделяются описанные в ряде работ (*Горельчик, Гарбузова, 2001; Горельчик и др., 2004 и др.*) уровни глубоких, промежуточных и приповерхностных землетрясений под Ключевским вулканом. При этом наиболее ярко выражены 2 зоны: глубинная зона, в диапазоне 25-32 км, и приповерхностная зона, в диапазоне глубин от 2 км ниже уровня океана, до 4 км выше уровня океана (в постройке вулкана). Необходимо отметить, что глубинная сейсмоактивная зона по своему расположению и глубине соответствует низкоскоростной аномалии, выделенной по данным сейсмической томографии (*Гонтовая и др., 2003; 2007*).



**Рис. 4.3.** Плотность распределения энергии землетрясений под Ключевским вулканом в 1998-2002 гг. Радиус осреднения 1.5 (км, сут.).  
Условные обозначения см. на рис. 4.4.

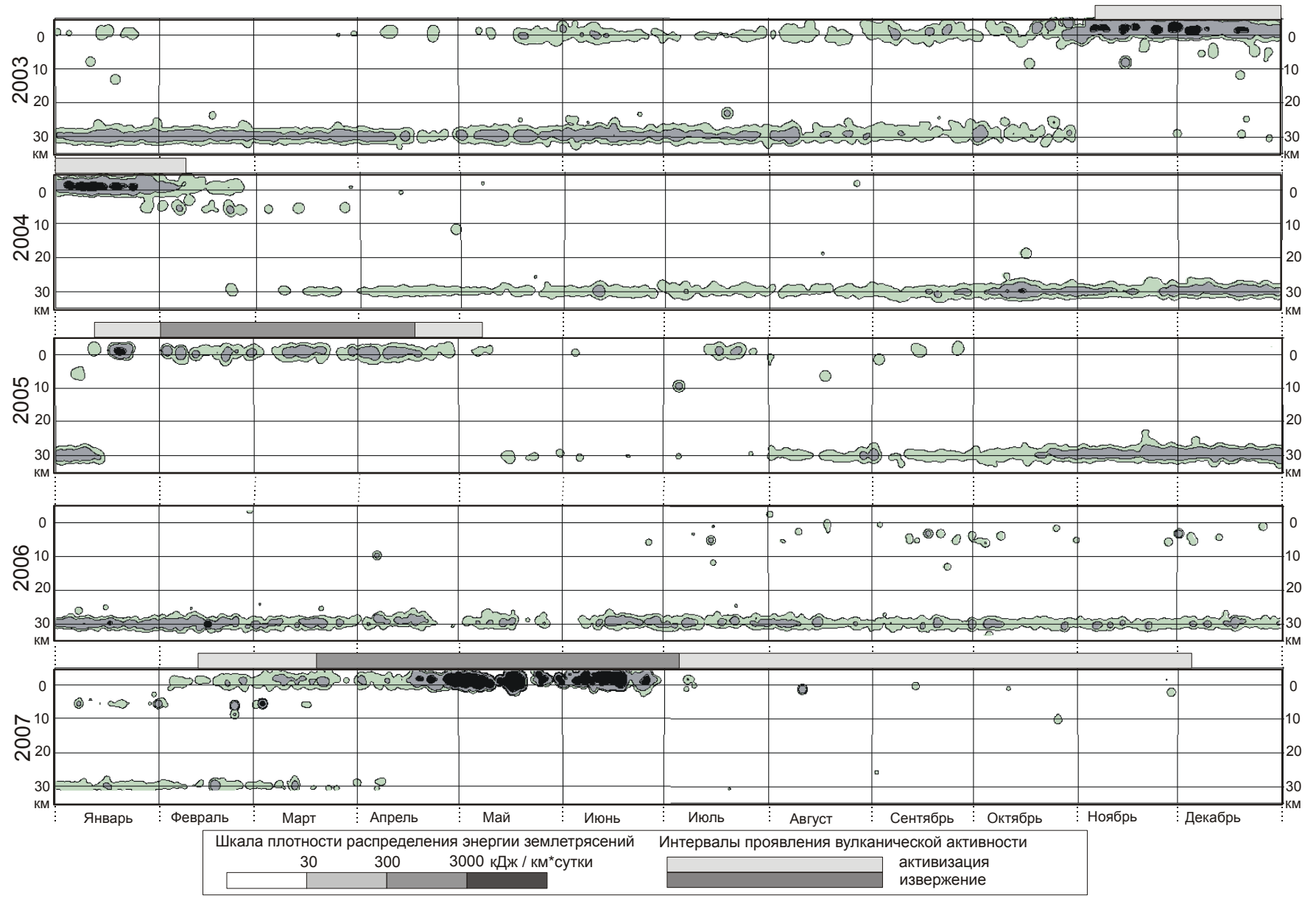


Рис. 4.4. Плотность распределения энергии землетрясений под Ключевским вулканом в 2003-2007 гг. Радиус осреднения 1.5 (км, сут.).



За рассматриваемый период времени сейсмическая активность в пределах этих зон проявлялась неравномерно. Причем явно прослеживается обратная корреляция в проявлениях сейсмической активности глубинной и приповерхностной зон. Так, с марта 1999 по июнь 2001 г. глубинная зона фактически никак себя не проявляла, в этот же период приповерхностная зона была весьма активна. И хотя длительной активизации вулкана в это время не отмечалось, тем не менее, по визуальным наблюдениям неоднократно наблюдались сравнительно кратковременные эпизоды усиления парогазовой активности с выносом пепла и небольшими эксплозиями. (рис.4.3). Аналогичные примеры «отрицательной обратной связи» этих двух зон можно проследить также с ноября 2003 по февраль 2004 г. и с января по декабрь 2007 г. (рис.4.4.). Последние примеры особенно интересны, т.к. в указанные периоды наблюдались яркие проявления вулканической активности.

В сентябре-октябре 2003 г. появились первые признаки активизации Ключевского вулкана в виде повышенного уровня вулканического дрожания. В декабре 2003 - январе 2004 гг. в ночное время отчетливо наблюдалось свечение над вершиной вулкана. При этом с ноября 2003 по февраль 2004 г. сейсмическая активность в глубинной зоне практически исчезла, а в приповерхностной резко возросла (рис.4.4). Хотя полноценного извержения в этот период времени не произошло, свечение над кратером однозначно свидетельствовало о подъеме магмы в жерле вулкана и заполнении его вершинного кратера. В январе 2005 г. на Ключевском вулкане снова начался подъем магмы к вершинному кратеру и стало наблюдаться яркое свечение над вершиной вулкана, при этом резко возросла сейсмическая активность приповерхностной зоны и исчезли признаки сейсмической активности в глубинной зоне (рис.4.4). К концу января 2005 г. магма переполнила кратер и началось вершинное извержение Ключевского вулкана, продолжавшееся до середины апреля 2005 г. В апреле-мае 2005 г. сейсмическая активность приповерхностной зоны заметно ослабла, при этом «оживла» глубинная зона. С июня по декабрь 2005 г. сейсмическая активность глубинной зоны постепенно возрастала при одновременном ослаблении активности в постройке вулкана. Аналогичная картина наблюдалась и при следующем, еще более мощном извержении Ключевского вулкана в 2007 году. Это извержение началось в конце марта 2007 года, хотя признаки активизации отмечались с середины февраля. С началом извержения сейсмическая активность глубинной зоны также сошла «на нет», а сейсмическая активность приповерхностной зоны резко возросла (рис.4.4). Необходимо добавить, что в последующий период времени (с января 2008 по май 2009 г., не отраженный на рис.4.3 и 4.4) отмечалась все та же закономерная связь между вулканической активностью и проявлениями поверхностной и глубинной зон сейсмической активности под вулканом. Во время извержения (с середины ноября 2008 г. по начало января 2009 г.) активность глубинной зоны вновь сошла «на нет», и стала восстанавливаться лишь в феврале 2009 г., после окончания извержения.

Рассмотренные закономерные связи проявлений вулканической и сейсмической активности Ключевского вулкана находят простое объяснение в рамках гидроконвекционной гипотезы. Действительно, при подъеме магмы увеличивается высота магматической колонны и возрастает давление в промежуточном очаге. Соответственно, увеличивается растворимость летучих в магме. Процесс отделения свободной флюидной фазы прекращается и ГДП-землетрясения в промежуточном очаге исчезают. Снижение уровня магмы в подводящих каналах приводит к соответствующему уменьшению давления в промежуточном очаге и возобновлению процесса отделения свободной флюидной фазы из пересыщенного летучими магматического расплава, при этом вновь начинает проявляться и сейсмическая активность глубинной зоны.

Сейсмическая активность приповерхностной зоны, по-видимому, также в значительной мере связана с выделением свободной флюидной фазы из магматического расплава и ее взаимодействием с вмещающими гидрогеологическими комплексами земной коры. Содержащийся в магме свободный водный флюид находится под давлением, соответствующим гидростатическому давлению магмы, которое определяется плотностью и высотой магматической колонны. В тоже время, в верхней части земной коры давление флюидной фазы во вмещающих горных породах определяется гидростатическим давлением грунтовых вод, т.е. зависит, в основном, от высоты водного столба. Плотность воды примерно втрое меньше плотности магмы, и, соответственно, давление свободной флюидной фазы, содержащейся в магматической колонне примерно втрое превышает давление грунтовых вод в окружающих горных породах земной коры. Поэтому переход свободной флюидной фазы из магмы во вмещающие горные породы должен сопровождаться резкими изменениями ее объема и, соответственно, возникновением сейсмиче-

ских событий дилатационной природы. Особенно значительные изменения объема при таком переходе будут иметь место при достижении магмой отметок с «докритическим» давлением воды во вмещающих гидрогеологических комплексах, т.е. при давлении менее 225 атм. (или менее 2250 м водного столба). Следовательно, подъем магмы на глубины докритических давлений грунтовых вод (менее 2.2-2.5 км) должен сопровождаться резким увеличением сейсмичности приповерхностной зоны.

По-видимому, рассмотренные процессы в значительной мере определяют сейсмическую активность приповерхностных зон и под другими действующими вулканами, в частности – под вулканом Шивелуч, где в 2001 г. при подготовке к извержению и в процессе самого извержения отмечался отчетливый максимум сейсмической активности на глубинах порядка 2-2.5 км.

## 4.2. ГИДРОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЧЕТВЕРТИЧНЫЙ ВУЛКАНИЗМ

Вулканическая активность в геологическом времени не оставалась постоянной, а скорее проявлялась эпизодически в течение всей геологической истории Земли. Кайнозойский отрезок истории в этом отношении не является исключением. Полученные к настоящему времени многочисленные фактические данные указывают на эпизодичность и глобальное усиление вулканической активности в позднем кайнозое, что особенно ярко проявилось в четвертичное время. Об этом свидетельствуют распределение прослоев вулканических пеплов в осадочном чехле Мирового океана, изученных в скважинах глубоководного бурения, а также датировки серий вулканических пород и отложений тефры по обрамлению Тихого океана (Кеннет, 1987).

Глобальное усиление вулканической активности - не единственная примечательная черта позднего кайнозоя. К этому периоду времени относится и существенное изменение характера эвстатических колебаний уровня Мирового океана, прогрессирующее влияние на эвстатический процесс высокочастотной составляющей - циклов четвертого порядка, длительностью от десятков до первых сотен тысячелетий. Наиболее полные и представительные данные по этим циклам получены благодаря успешному применению изотопно-кислородного и палеомагнитного методов при изучении колонок глубоководных осадков (Shackleton, Opdyke, 1973; Shackleton, Opdyke, 1976). Основные особенности этих циклов были рассмотрены выше, в разделе 1.4.

Позднекайнозойские эвстатические циклы 4-го порядка обусловлены исключительно перемещениями водных масс между океаном и сушей в процессе роста и деградации ледников, т.е. по своей природе являются гляциоэвстатическими (Николаев, 1972). Причина их прогрессирующего влияния на неоген-четвертичный эвстатический процесс связывается с проявлением высокоамплитудных колебаний в системе ледники-океан-атмосфера, обусловленных развитием антарктического покровного оледенения вследствие постепенного смещения Антарктиды в южные полярные широты и возникновение циркумполярного Антарктического течения (Ушаков, Ясманов, 1984). Судя по изотопно-кислородным данным (Кеннет, 1987), незначительные по амплитуде гляциоэвстатические колебания уровня океана отмечались еще в среднем и верхнем миоцене. Но максимального размаха (более 100 м) они достигли лишь в плейстоцене и в значительной мере обусловили современный облик побережий и шельфа Мирового океана.

### 4.2.1. Эвстазия и вулканизм

Каковы же временные связи между глобальными эвстатическими циклами различных порядков и периодами усиления вулканической активности?

Кайнозойское время характеризуется постепенным усилением вулканической активности, что особенно заметно проявилось в позднем кайнозое (Кеннет, 1987). В частности, для обрамления Тихого океана по наземным данным в позднем кайнозое выделяют 4 крупных эпизода усиления вулканической активности: каскадный (четвертичное время), фиджийский (раннеплиоценовый), андийский (позднемиоценовый) и колумбийский (среднемиоценовый) (Кеннет, 1987). Несмотря на то, что эти эпизоды относятся лишь к тихоокеанскому региону, они нашли достаточно отчетливое выражение и в диаграмме средней частоты встречаемости прослоев вулканических пеплов в осадочном чехле Мирового океана, (рис.4.5а), составленной Дж. Кеннетом по данным глубоководного бурения и характеризующей глобальные изменения эксплозивной вулканической активности (полного соответствия здесь, очевидно, ожидать трудно). Заметим, что кайнозойское время соответствует нисходящей ветви последнего эвстатического цикла первого порядка, т.е. неоген-четвертичное усиление вулканической активности происходило на фоне последовательного понижения уровня океана.

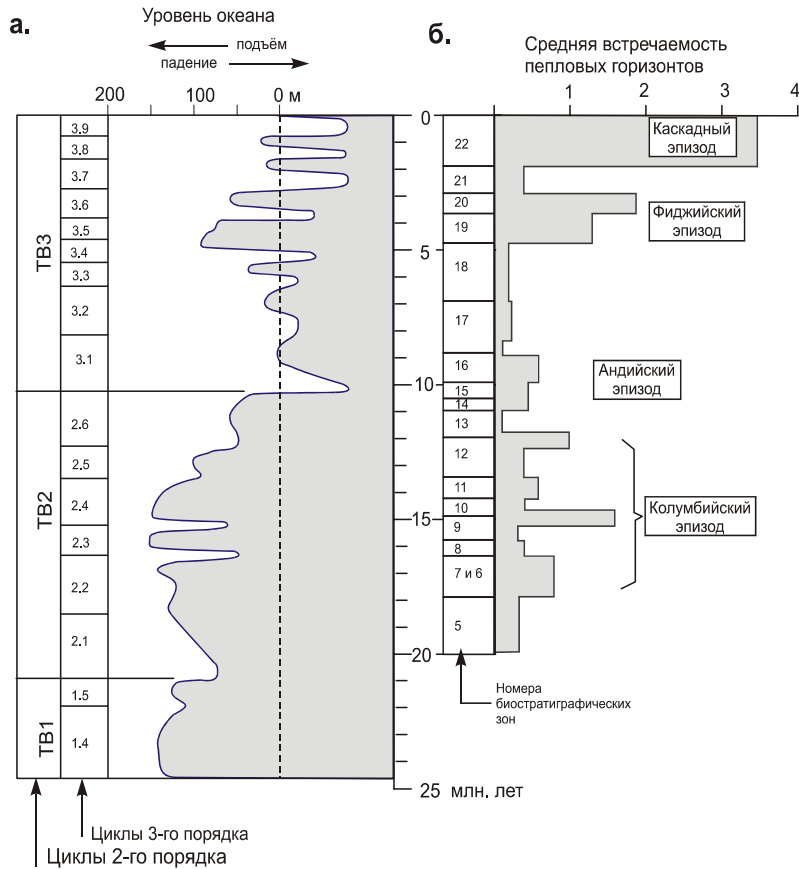
Детальность диаграммы распределения прослоев вулканических пеплов в осадочном чехле Мирового океана (рис.4.5б) невысока и ограничена протяженностью отдельных биостратиграфических зон. Всё же сравнивая эту диаграмму с глобальной эвстатической диаграммой циклов 2-го и 3-го порядков (рис.4.5, а), можно заметить, что вспышки эксплозивной вулканической активности (в пределах биостратиграфических зон 22, 19-20, 14-16, 7-6 и на границе зон 9-10 и 12-13) тяготеют к участкам временной шкалы, где появляются экстремальные значения низкого уровня океана в циклах 3-го порядка, причем само появление этих экстремальных значений на эвстатической диаграмме, судя по изотопно-кислородным данным (Кеннет, 1987), обусловлено «вспышками» более высокочастотных, гляциоэвстатических циклов 4-го порядка (в плейстоцене, плиоцене, и, вероятно, в верхнем и среднем миоцене). Максимальное количество прослоев вулканических пеплов залегает в биостратиграфически нерасчленённом верхнеплиоцен-четвертичном разрезе морских осадков (биостратиграфическая зона №22, последние 1.8 млн. лет). Этому же отрезку времени, особенно второй его половине, соответствует и главный всплеск гляциоэвстатической активности с максимальными по амплитуде колебаниями уровня океана (до 130-140 м).

Таким образом, прослеживается вполне определённая связь периодов усиления вулканической активности с проявлениями гляциоэвстатических колебаний уровня океана (циклов 4-го порядка). Как же соотносятся отдельные фазы этих гляциоэвстатических циклов с периодами усиления вулканической активности?

Судя по крупнейшим датированным вулканическим событиям плейстоцена, глобальное усиление эксплозивной вулканической активности в островных дугах с образованием гигантских кальдер и максимальными объёмами пирокластических покровов и игнимбригов, происходило в периоды гляциоэвстатических понижений уровня океана на величину 100-130 м относительно современного, т.е. в периоды максимальных оледенений суши, соответствующие чётным стадиям изотопно-кислородной диаграммы Шеклтона-Опдайка. На рис.4.6 проиллюстрирована временная связь периодов глобальных вспышек кислого вулканизма (по данным (Мелекесцев, 1980; Мелекесцев и др., 1974; Эрлих, 1973)) с периодами плейстоценовых понижений уровня океана (чётными изотопно-кислородными стадиями) для последних 500 тыс. лет.

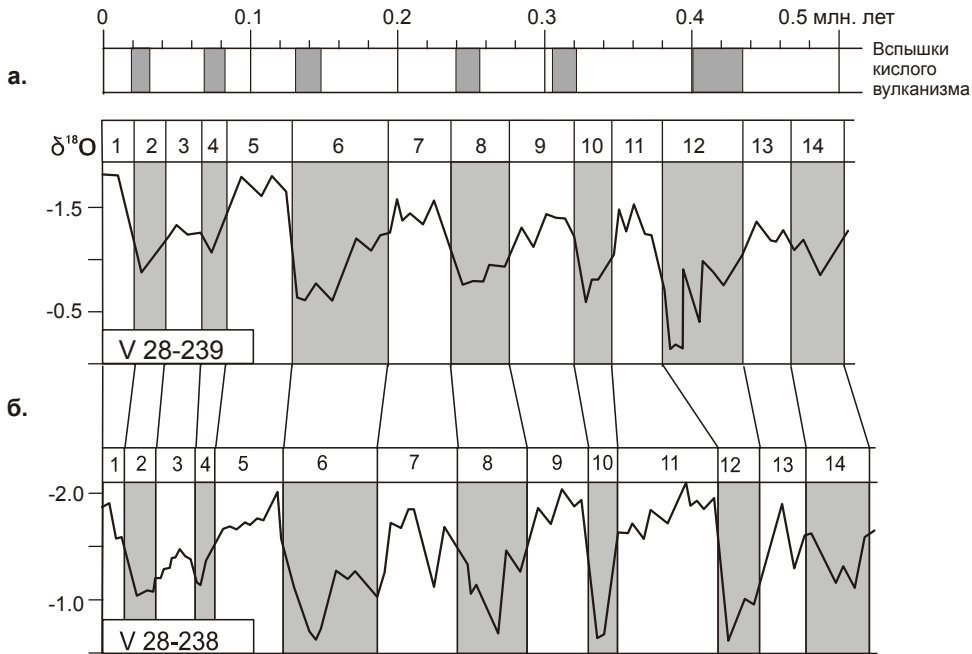
Эта закономерная связь сохраняется и для отдельных регионов, в частности - по северному и западному обрамлению Тихого океана. На Аляске в ледниковые периоды, соответствующие трем последним чётным изотопно-кислородными стадиями (№№2, 4, и 6, соответственно 18-40, 70-90 и 125-190 тыс. лет назад), были образованы гигантские маары (Beget et al., 1997). На Камчатке, в Японии и Новой Зеландии в верхнем плейстоцене с чётными стадиями 2 и 4 связаны максимальные объёмы изверженных пород (рис.4.7а,б,в,г). С этими ледниковыми стадиями на Камчатке и Курилах, судя по датировкам и соотношению пирокластических покровов и игнимбригов с ледниковыми отложениями, связано образование кальдер Крашенинникова, Карымского озера, древнего Курильского озера, кальдер вулканов Авачинского, Шивелуча, Ксудача, Малого Семьячика, Горелого, Опалы, молодой кальдеры Узонско-Гейзерной депрессии, на о. Итуруп – кальдер Урбич, Цирк и Медвежья, на о. Симушир – кальдер древняя Заварицкого и Броутона, на о. Онекотан – кальдеры Немо, на о. Кунашир – кальдер Менделеева и Головнина (Мелекесцев, 1980; Мелекесцев и др., 1974; Эрлих, 1973; Braitseva et al., 1995). На рис.4.7 (д) представлено распределение наиболее поздних из этих событий, соответствующих последней чётной изотопно-кислородной стадии (№2) верхнего плейстоцена (по данным радиоуглеродных датировок, опубликованных в работе (Braitseva et al., 1995)).

Необходимо отметить, что крупнейшее за весь плейстоцен извержение вулкана Тоба на о. Суматра (73.5 +/- 3.5 тыс.л.н.), с которым некоторые исследователи связывают начало верхнеплейстоценового оледенения (Rampiro, Self, 1992; Ramaswamy, 1992), произошло в период низкого уровня океана (рис.4.7г), т.е. уже в разгар верхнеплейстоценового ледникового периода, и, очевидно, может рассматриваться лишь в качестве следствия, но не причины этого оледенения, т.е. гигантское извержение вулкана Тоба, как и другие сильнейшие плейстоценовые извержения, были инициированы, вероятнее всего, глобальными климатическими изменениями и сопутствующими гидросферными процессами.



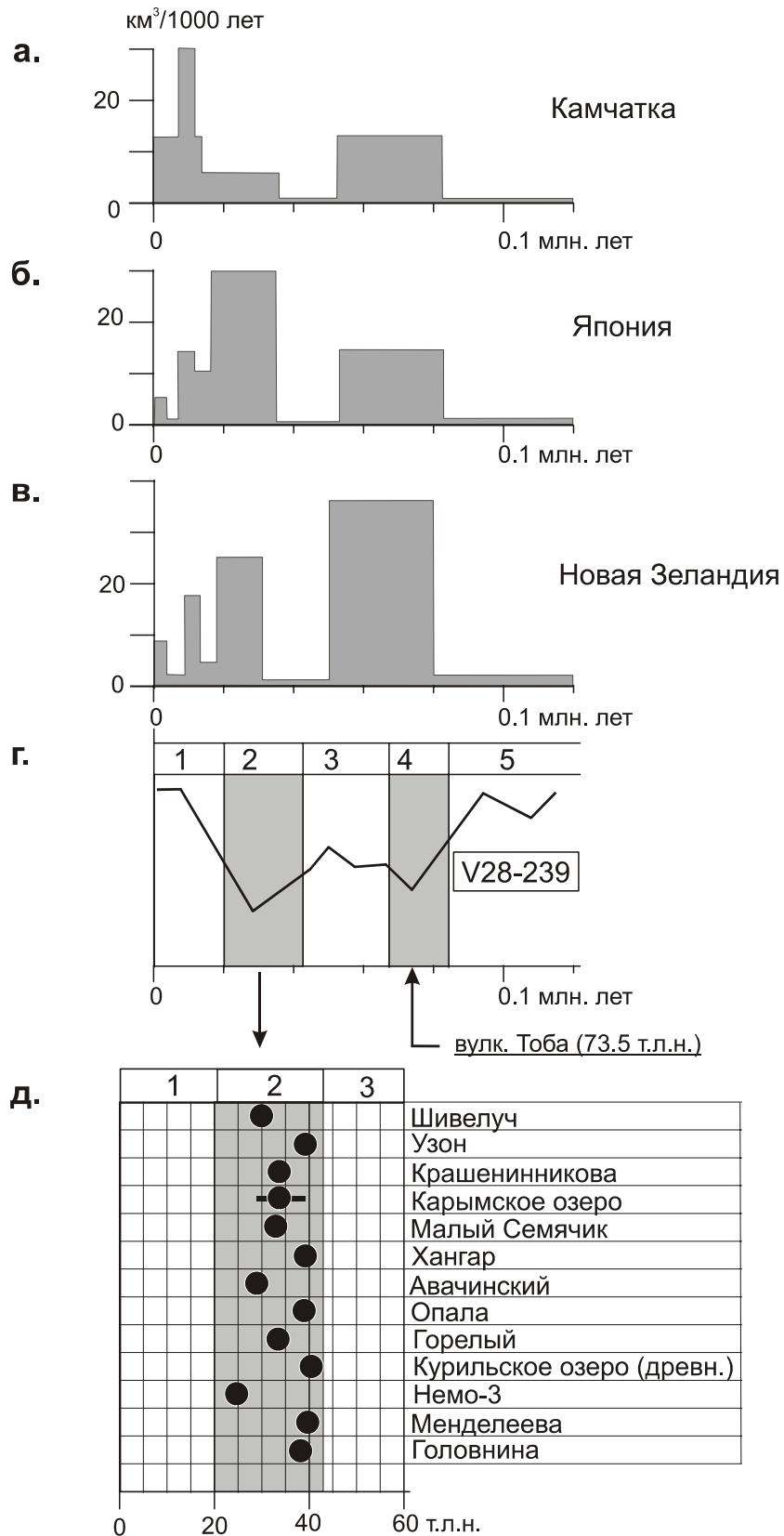
**Рис.4.5.** Эвстазия и вулканическая активность позднего кайнозоя.

*а* - диаграмма глобальных изменений уровня океана в позднем кайнозое (циклы 2 и 3-го порядков) по данным (Hag et al., 1987); *б* - средняя встречаемость горизонтов вулканического пепла в осадочном чехле Мирового океана по данным глубоководного бурения (Кеннет, 1987).



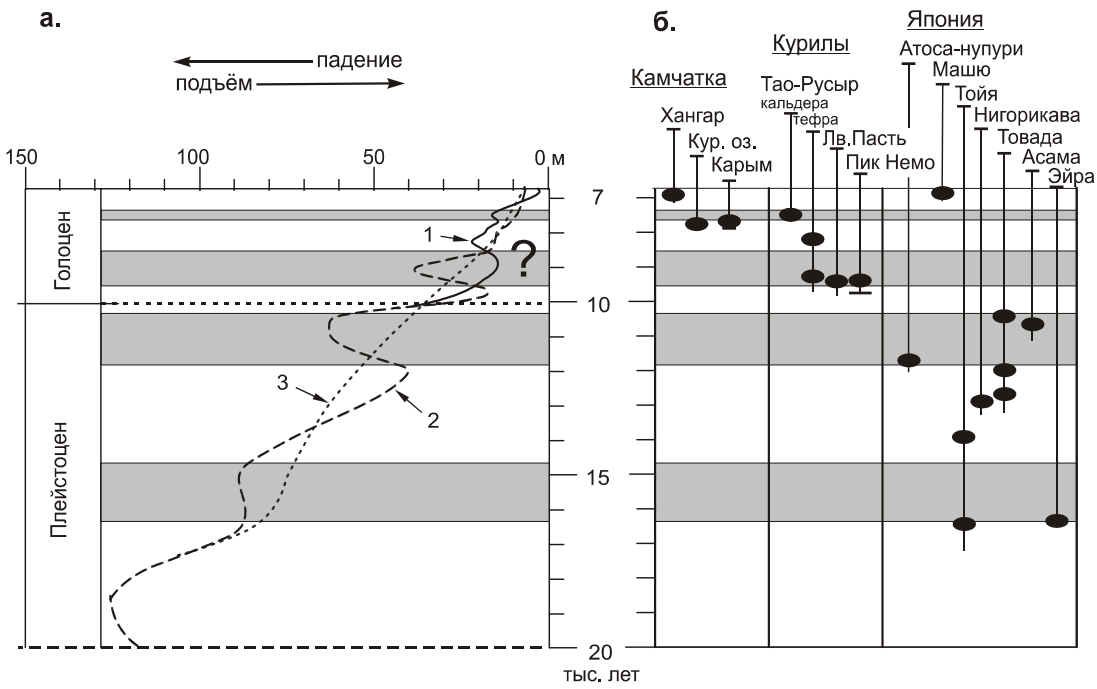
**Рис. 4.6.** Изотопно-кислородные стадии плейстоцена и вулканическая активность.

*а* - периоды глобальных вспышек кислого вулканизма, по данным (Мелекесцев, 1980; Эрлих, 1973); *б* - изотопно-кислородные диаграммы тихоокеанских колонок глубоководных осадков, по данным (Shackleton, Opdyke, 1973, Shackleton, Opdyke, 1976).



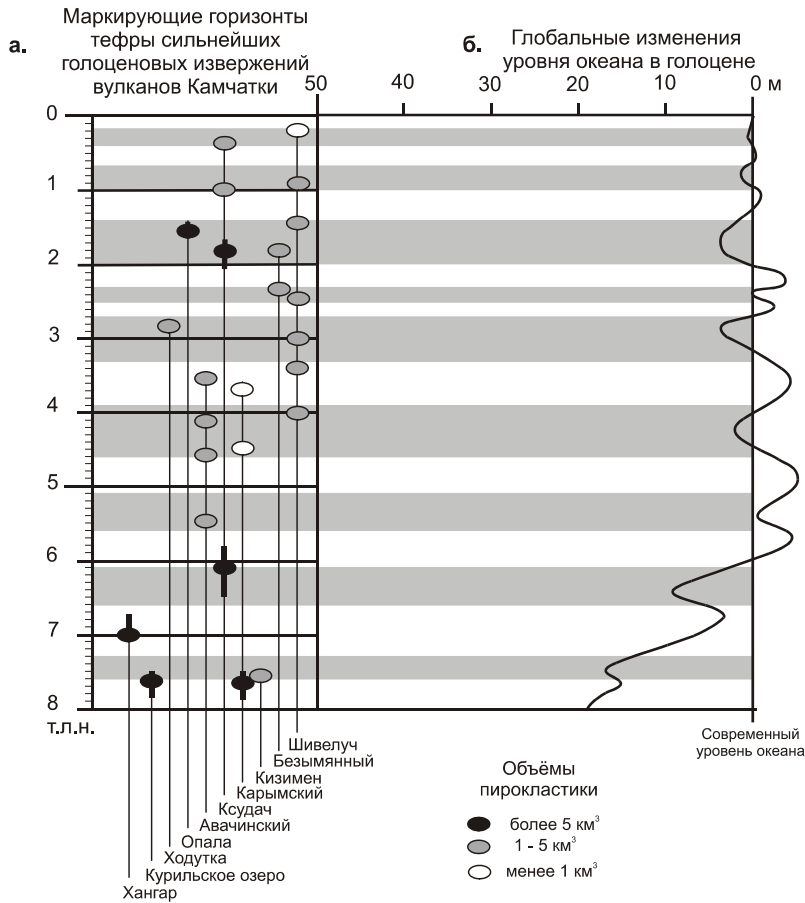
**Рис. 4.7.** Изотопно-кислородные стадии и вулканическая активность верхнего плейстоцена.

Сведения о вулканической активности приведены по данным (Мелекесцев, 1980; Мелекесцев и др., 1974; Эрлих, 1973; Braitseva et al., 1995; Rampiro, Self, 1992).



**Рис.4.8.** Эвстатические колебания уровня океана и крупнейшие вулканические события на Камчатке, Курилах и в Японии в конце плейстоцена начале голоцена.

*а* - диаграммы изменений уровня океана в конце плейстоцена-голоцене (Кеннет, 1987); эвстатические диаграммы: 1 - Фейбриджа, 2 - Каррея, 3 - осредненная; *б* - датированные пирокластические покровы Камчатки, Курил и Японии (Мелекесцев, 1980; Эрлих, 1973).



**Рис.4.9.** Голоценовые колебания уровня океана и вулканизм Камчатки

*а* - распределение основных маркирующих горизонтов тефры голоценовых извержений вулканов Камчатки по данным (Брайцева и др., 1985; Брайцева и др., 1997; Braitseva et al., 1995); *б* - диаграмма глобальных эвстатических изменений уровня океана в голоцене по Фейбриджу (Кеннет, 1987).

Около 18 тыс. лет назад началось верхнеплейстоцен-голоценовое повышение уровня океана, соответствующее восходящей ветви последнего цикла 4-го порядка. Монотонность этого процесса нарушалась более высокочастотной составляющей – эвстатическими циклами 5-го порядка продолжительностью от первых тысяч до нескольких сот лет. Судя по эвстатическим диаграммам Фейбриджа и Каррея, максимальные амплитуды этих колебаний (до 30-40 метров) отмечались в самом конце плейстоцена – начале голоцена (7-14 тыс. лет назад). На Камчатке, Курилах и в Японии этому периоду времени также соответствует вспышка вулканической активности (рис.4.8). В частности, в это время на Камчатке образовались кальдеры вулкана Карымский и Курильского озера, а на Курилах - кальдеры Тао-Русыр (о. Онекотан) и Львиная Пасть (о. Итуруп) (*Мелекесцев и др., 1974; Эрлих, 1973*). Привязать конкретные вулканические события конца плейстоцена – начала голоцена к отдельным фазам эвстатических циклов 5-го порядка пока невозможно из-за недостаточной точности радиоуглеродного метода и неоднозначности эвстатических диаграмм в пределах этого временного интервала. Однако на представленных на рис.4.8 диаграммах отчетливо видна широтная зависимость времени проявления сильнейших вулканических событий позднего плейстоцена - раннего голоцена: в Японии основная часть этих событий произошла в конце плейстоцена, а на Курилах и Камчатке - в начале голоцена. Возможно, что эта зависимость обусловлена процессом деградации плейстоценовых ледников, который на Камчатке завершился позднее, чем на Курилах и в Японии.

Для последних 8 тыс. лет голоценовой истории (рис.4.9) на эвстатической диаграмме Фейбриджа можно выделить 9 циклов 5-го порядка с амплитудой изменения уровня океана от первых до нескольких метров. В соответствии с этой диаграммой, понижениям уровня океана соответствуют интервалы: 0.17-0.40, 0.65-1.0, 1.4-2.0, 2.3-2.5, 2.7-3.3, 3.9-4.6, 5.1-5.6, 6.1-6.6 и 7.3-7.6 тыс. лет назад. При сравнении этих интервалов с голоценовой историей вулканизма на Камчатке выявляется определённая закономерность: датировки не всех, но большинства сильнейших эксплозивных извержений по времени тяготеют к регрессивным стадиям в циклах 5-го порядка. В этом несложно убедиться, сравнив перечисленные интервалы времён с представленными на рис.4.9 датировками горизонтов тефры, используемых в качестве маркирующих при тефрохронологических исследованиях (*Брайцева и др., 1985; Брайцева и др., 1997; Кирьянов и др., 1986; Braitseva et al., 1995*). Эвстатическая диаграмма Фейбриджа основана на геоморфологических наблюдениях и данных радиоуглеродного датирования морских отложений из различных районов земного шара. Её сопоставление с радиоуглеродными датировками тефры представляется вполне правомерным. Всё же важно подчеркнуть, что упомянутая выше связь сильнейших вулканических событий голоцена с определёнными фазами эвстатической диаграммы Фейбриджа не является бесспорной и нуждается в дополнительном экспериментальном подтверждении, поскольку фактическая точность радиоуглеродных датировок иногда сопоставима с периодами эвстатических циклов 5-го порядка.

В работе (*Кирьянов и др., 1986*) акцентировано внимание на приуроченности пепловых горизонтов в торфяниках о. Беринга к периодам голоценовых похолоданий, выявляемых по споро-пыльцевым диаграммам. Очевидно, что эти периоды ассоциируются с регрессивными стадиями голоценовых эвстатических циклов 5-го порядка.

#### 4.2.2. О возможных механизмах влияния глобальных изменений уровня океана на вулканическую активность

Таким образом, мы приходим к выводу о тесной связи периодов усиления вулканической активности на Камчатке, Курилах и, по-видимому, в других островных дугах западной части Тихого океана с гляциоэвстатическими циклами 4-го и, вероятно, 5-го порядков, точнее – с регрессивными стадиями этих циклов. Судя по опубликованным данным, такая закономерность известна и для некоторых других регионов, расположенных в средних широтах и непосредственно граничащих с обширными акваториями Мирового океана. В частности, в Атлантическом океане на Азорских о-вах методами абсолютной геохронологии показано усиление вулканической активности в периоды низкого уровня океана в верхнем плейстоцене - голоцене (*Guillou et al., 1998*).

В то же время, для районов, несколько удалённых от океанов, в частности для Средиземноморья (*McGuire, 1997*), закономерная временная связь вспышек вулканизма с плейстоцен-голоценовыми регрессивными стадиями существует, но отмечается значительный сдвиг по фа-

зе между этими явлениями. В районах же развития покровных оледенений, судя по данным бурения ледников Антарктиды и Гренландии, эта зависимость вообще становится обратной (*Parterne et al., 1997*). Эти факты, очевидно, свидетельствуют не в пользу распространённых представлений о том, что вулканическая активность является главной причиной глобальных изменений климата и, соответственно, глобальных гляциоэвстатических колебаний уровня океана. Нет оснований сомневаться в том, что крупные эксплозивные извержения способны вызвать сравнительно кратковременные региональные климатические изменения. Такие явления достоверно задокументированы для сильнейших исторических извержений вулканов: Лаки (1783 г.), Тамбора (1815 г.), Кракатау (1883 г.), Санта-Мария (1902 г.), Катмай (1912 г.), Пинатубо (1991 г.) и некоторых других извержений (*McCormick, 1992; Self et al., 1981*). Тем не менее, рассмотренные выше примеры закономерных связей между глобальными изменениями уровня океана и вулканической активностью по различным регионам Земли скорее указывают на правомерность иной точки зрения: глобальные изменения климата и связанные с ними глобальные изменения уровня океана существенно влияют на вулканическую активность.

Такая постановка вопроса не нова. Еще в 1972 г. Н.И. Николаев указал на возможный механизм такого влияния (*Николаев, 1972*). Его сущность заключается в проявлении гидроизостазии – изостатической реакции недр Земли (в том числе астеносферы и гидравлически связанных с ней магматических систем) на глобальные изменения уровня океана. Т.е. фактически предполагается, что изменения гидростатического давления на дно океана в процессе глобальных изменений его уровня достаточно быстро передаются через астеносферу островодужным и внутриплитовым магматическим системам. Исходя из этих представлений, можно указать, по крайней мере, на два фактора, способствующие процессам кальдерообразования и усилению эксплозивной вулканической активности в островных дугах в периоды резких гляциоэвстатических понижений уровня океана.

В районах, не подверженных покровным оледенениям, глобальное понижение уровня океана ведёт к сбросу давления в астеносфере (в предельном случае – на 10-12 бар) и должно сопровождаться соответствующим сбросом давления во всей системе гидравлически связанных с ней магматических очагов, в том числе периферических, находящихся на небольших глубинах, где снижение давления должно сопровождаться частичным оттоком магмы и её замещением водным флюидом. Такой процесс ведёт к росту касательных напряжений над периферическими очагами и способствует обрушению их кровли, т.е., в соответствии с существующими представлениями (*Слэзин, 1987*), может являться если не главной причиной, то «спусковым крючком» или, точнее, «дирижерской палочкой» для активизации кальдерообразующих движений и связанных с ними сильнейших извержений с частичным опустошением периферических очагов, образованием игнимбритов и мощных пирокластических покровов.

Известно, что растворимость водного флюида в магме снижается с уменьшением давления (*Барабанов, 1985*), т.е. уменьшение давления в магматической системе должно вести к выделению свободного водного флюида из водонасыщенных магм в периферических очагах и верхних участках магматических колонн. Кроме того, сброс давления в магматических системах ведёт к нарушению установившегося водно-флюидного равновесия между магмой и вмещающими горными породами, способствуя дополнительному обогащению магм свободным водным флюидом. Иначе говоря, в периоды понижения уровня океана в верхних частях магматических систем, непосредственно влияющих на вулканическую активность, повышается относительное содержание свободного водного флюида, что ведёт к некоторому снижению плотности магм и увеличению их эксплозивности. По-видимому, этот процесс весьма чувствителен даже к сравнительно небольшим колебаниям давления в магматической колонне и способен привести к резкому усилению эксплозивной активности вулканов в регрессивные стадии циклов не только 4-го, но и 5-го порядка. Не исключено, что сходные гидромагматические процессы, приводящие к эксплозивным извержениям, могут происходить и при снятии упругих напряжений в ходе сильнейших сейсмических событий вблизи магматических очагов. Примеры такой последовательности проявления сейсмичности и вулканизма хорошо известны. Последний из них – одновременные извержения вулканов Карымского и в кальдере Академии Наук на Камчатке в начале января 1996 г., которые последовали сразу после близкого сильного землетрясения (*Федотов, 1997*).

Необходимо отметить, что в районах развития покровных и мощных горно-долинных плейстоценовых оледенений гляциоэвстатические колебания уровня океана сопровождались резкими изменениями массы льда на суше. Здесь характер влияния гидросферных процессов на



магматические системы должен был определяться соотношением противоположных по знаку явлений гидро- и гляциоизостазии, т.е. в значительной мере зависит от динамики роста и деградации ледников. Тем не менее, на Камчатке и в других районах развития мощных плейстоценовых горно-долинных оледенений отмечается всё та же закономерная связь крупнейших вулканических событий с регрессивными стадиями плейстоцена. Можно указать, по крайней мере, на три фактора, объясняющих эту закономерность.

Во-первых, изостазия не проявляется локально вследствие высокой эффективной жесткости литосферы. Заметная изостатическая реакция от изменения ледниковой нагрузки достигается лишь для значительных по величине территорий, поперечные размеры которых измеряются сотнями километров (Николаев, 1988). Т.е., несмотря на значительную мощность отдельных ледников, средняя гляциоизостатическая составляющая на территории такого размера может оказаться по величине заметно меньше гидроизостатической составляющей.

Во-вторых, региональные проявления гляциоизостазии весьма инерционны. Время проявления компенсационных изостатических движений при изменении ледниковой нагрузки достигает первых десятков тысяч лет (Николаев, 1988). Иными словами, проявления гляциоизостазии в районах горно-долинных оледенений по фазе могут заметно отставать от изменений давления в астеносфере, обусловленных глобальными изменениями уровня океана.

И, наконец, в-третьих, интенсивнейшая эрозионная деятельность ледников, их собственный рост и деградация ведут к перераспределению нагрузки на земную поверхность и, вероятно, могут оказывать самостоятельное деструктивное воздействие на неглубоко залегающие периферические очаги. Действительно, перераспределение нагрузки на земную поверхность неизбежно сопровождается активизацией блоковых движений в верхней части земной коры. Очевидно, что блоковые движения в кровле неглубокого периферического очага способны спровоцировать её разрушение, следствием которого может быть сильнейшее кальдерообразующее извержение. Возможно, что перечисленные выше экзогенные факторы оказали заметное влияние на эксплозивную активность вулканов Камчатки в конце плейстоцена – начале голоцена и обусловили отмеченное выше запаздывание сильнейших вулканических событий этого периода на Камчатке по сравнению с событиями подобного масштаба в более южных районах - на Курилах и в Японии.

В заключении обратим внимание на то, что два рассмотренных выше глобальных процесса (понижение уровня океана и эксплозивная вулканическая активность) имеют положительную обратную связь, т.е. усиление одного из них способствует усилению другого. По-видимому, это взаимное влияние следует учитывать при оценке роли вулканизма в колебательных процессах системы ледники-океан-атмосфера и, соответственно, в глобальных изменениях климата Земли.

#### 4.3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. Представлены основные положения гидроконвекционной гипотезы островодужного магматизма, в соответствии с которой данный тип магматизма рассматривается как следствие дегидратации погружающейся литосферной плиты. При этом предполагается существование в островных дугах замкнутых гидроконвекционных магматических систем, обуславливающих эффективный перенос летучих и тепла из астеносферы в земную кору, и способных к длительному существованию без проявлений вулканизма. Из этого предположения следует, что при оценке вулканической опасности в зонах проявления современного островодужного магматизма необходимо принимать во внимание не только действующие вулканы, но и активные магматические системы, над которыми действующие вулканы отсутствуют. Необходимо отметить, что при обосновании гидроконвекционной гипотезы рассмотрена «идеализированная» модель магматической системы, объясняющая некоторые общие закономерности, но далеко не исчерпывающая всего многообразия конкретных проявлений островодужного магматизма.

2. В соответствие с представленной гипотезой, глубина образования промежуточных магматических очагов в островных дугах определяется содержанием растворенной в магме воды и соответствует Р-Т условиям выделения из магмы свободной флюидной фазы. Частичная дегидратация магмы сопровождается увеличением ее плотности, что создает условия для замкнутой магматической циркуляции между астеносферным и промежуточным очагом, т.е. для образования гидроконвекционной магматической системы.

3. В рамках данной гипотезы на примере Ключевского вулкана рассмотрена возможная природа сейсмоактивных зон под действующими вулканами. По-мнению автора, значительная часть проявлений сейсмичности действующих вулканов (таких, как ГДП-землетрясения, низкочастотные составляющие вулканического дрожания и, частично, приповерхностные сейсмические события) может быть связана с процессами дегидратации магмы в промежуточных очагах и магматических каналах.

4. Выявлены временные связи между глобальными изменениями уровня океана и периодами глобального и регионального усиления вулканической активности в позднем кайнозое. Характер этих связей дает основания полагать, что эпизодичность проявлений позднекайнозойского вулканизма обусловлена, в первую очередь, прогрессирующим развитием в позднем кайнозое высокоамплитудных колебаний в системе ледники-океан-атмосфера, достигших максимальных значений в четвертичное время. Вспышки вулканической активности в островных дугах, как правило, по времени соответствуют регрессивным стадиям глобальных изменений уровня океана. Закономерные связи регрессивных стадий и сильнейших вулканических событий наиболее ярко проявились в плейстоцене. Временные соотношения этих двух глобальных процессов свидетельствуют о том, что именно глобальные изменения климата и связанные с ними изменения уровня океана были причиной существенного усиления вулканической активности в четвертичное время.

5. Механизм влияния позднекайнозойских гидросферных процессов на вулканическую активность состоит, вероятнее всего, в проявлении гидро- и гляциоизостазии: изостатической реакции астеносферы на изменения водной и ледниковой нагрузки на поверхность литосферы. Уменьшение этой нагрузки ведёт к соответствующему сбросу давления в подстилающих участках астеносферы и гидравлически связанных с ними магматических системах, в том числе - в неглубоких периферических очагах. Сброс давления в периферических очагах во время резких гляциоэвстатических понижений уровня океана приводит к активизации процессов дегидратации магм и нарушению сложившегося динамического равновесия в системе магматический расплав-вода-порода в сторону увеличения в этой системе содержания свободной флюидной фазы. Появление в периферическом магматическом очаге дополнительных объемов свободной флюидной фазы является, по-видимому, главной причиной развития деструктивных процессов в кровле очага, приводящей к активизации кальдерообразующих движений и связанных с ними наиболее крупномасштабных проявлений эксплозивного вулканизма с частичным опустошением магматического очага и образованием мощных игнибритовых отложений. Эти процессы активно развивались в периоды четных изотопно-кислородных стадий плейстоцена, соответствующие периодам наиболее высокоамплитудных глобальных понижений уровня океана. При этом глобальные гидросферные процессы, вероятнее всего, играли роль «спускового крючка» (или «дирижерской палочки») для начала кальдерообразующих извержений в подготовленных для таких извержений магматических системах.

6. Необходимо заметить, что в последние десятилетия зоны современного островодужного магматизма подвержены все возрастающему влиянию деятельности человека. Активно осваиваются геотермальные месторождения. Строятся гидроэлектростанции с искусственными водохранилищами. В тоже время, с учетом изложенных выше представлений, есть все основания полагать, что приповерхностные магматические очаги в островных дугах могут находиться в состоянии крайне неустойчивого динамического равновесия и чутко реагировать на изменения внешних условий. В этом случае даже незначительные изменения давления в самом очаге или перераспределение нагрузки на его кровлю способны спровоцировать сильнейшее, возможно - кальдерообразующее извержение. В настоящее время трудно оценить вероятность такого исхода антропогенного воздействия на приповерхностные магматические очаги, но совершенно очевидна необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований в этом направлении, которые должны предшествовать попыткам «освоения» энергетических и других ресурсов, связанных с современными островодужными магматическими системами.

---

---