

УДК 550.34 + 546.292

**ПОДЪЕМ МАНТИЙНЫХ ФЛЮИДОВ В РАЙОНАХ ОЧАГОВ СИЛЬНЫХ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И КРУПНЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОН: ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА**<sup>1</sup>Копничев Ю.Ф., <sup>2</sup>Соколова И.Н.<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Анализируются литературные данные о вариациях отношения содержания изотопов гелия (параметр  $R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ ) в подземных флюидах вблизи очаговых зон сильных землетрясений, а также в окрестностях некоторых крупных разломных зон (районы Тянь-Шаня, Монголии, Калифорнии, Центрального Хонсю и Центральных Апеннин). Показано, что во многих случаях наблюдается закономерное уменьшение величины параметра  $R$  по мере удаления от эпицентров сильных землетрясений и зон крупных региональных разломов. Выявленная закономерность трактуется как свидетельство подъема мантийных флюидов в верхнюю часть земной коры после сильных землетрясений, а также в некоторых разломных зонах, характеризующихся сверхвысокой проницаемостью, и дальнейшего расплывания их в горизонтальном направлении.

**ВВЕДЕНИЕ**

В [9-13] получены данные о пространственно-временных вариациях поля поглощения поперечных волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня, свидетельствующие о подъеме мантийных флюидов в земную кору. Вывод о подъеме флюидов из верхней мантии в очаговую зону землетрясения 1995 г. в Антофагасте (Чили,  $M=8.0$ ) сделан также на основании анализа вариаций скоростей  $P$ - и  $S$ - волн [29]. Это согласуется с данными метода магнитотеллурического зондирования, по которым в некоторых очаговых зонах выделены узкие каналы очень низкого сопротивления, рассекающие литосферу и проникающие на глубины  $\sim 100$  км [2].

В настоящей работе, продолжающей эти исследования, проводится дополнительная проверка существования выявленного эффекта путем анализа геохимических данных, опубликованных разными авторами, а именно, изотопного состава гелия в подземных флюидах вблизи от очагов сильных землетрясений в различных районах земного шара и, в первую очередь, в районе Центральной Азии. Для сравнения рассматриваются аномалии геохимического параметра вблизи некоторых крупных разломных зон, в том числе Таласо-Ферганского разлома в районе Тянь-Шаня и разлома Сан-Андреас в Калифорнии.

**СУТЬ МЕТОДА**

Как известно [16,18,27,30,31,34,], отношение содержания изотопов гелия  $R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  в свободно циркулирующих подземных флюидах варьируется в пределах примерно 3-х порядков (от  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$ ). При этом минимальные значения  $R$  соответствуют древней земной коре. В то же время в газах многих активных вулканов, термоминеральных источников и других объектов, происхождение которых связывается с дифференциацией и дегазацией мантии, обнаружены гораздо более высокие значения этого параметра, явно свидетельствующие о сохранении в мантии первичного гелия. В связи с этим изотопный

состав гелия является исключительно чувствительным индикатором проникновения мантийных флюидов в верхнюю часть земной коры [18]. Выявлена зависимость средних величин  $R$  от времени, прошедшего от последнего тектономагматического события в регионе, хотя даже в пределах одной и той же тектонической провинции разброс данных достигает почти трех порядков (как, например, для Байкальской рифтовой зоны [21]).

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ**

Анализировались первичные данные об изотопном составе гелия, опубликованные в [19-21,30,31,34] и относящиеся, в первую очередь, к районам Тянь-Шаня и Монголии, а также к некоторым районам Калифорнии, Италии и Японии. Для единообразия все величины параметра  $R$  нормировались к атмосферной величине:  $R' = R/R_{\text{at}}$ , где  $R_{\text{at}} = 1.4 \times 10^{-6}$ . Как правило, полученные данные исправлялись за контаминацию глубинных газов атмосферным воздухом [18]. В большинстве случаев рассматривались пространственные вариации параметра  $R'$ . Для двух районов (Нагано, Япония и Умбриа-Марче, Италия) изучались временные вариации  $R'$  в связи с сильными землетрясениями.

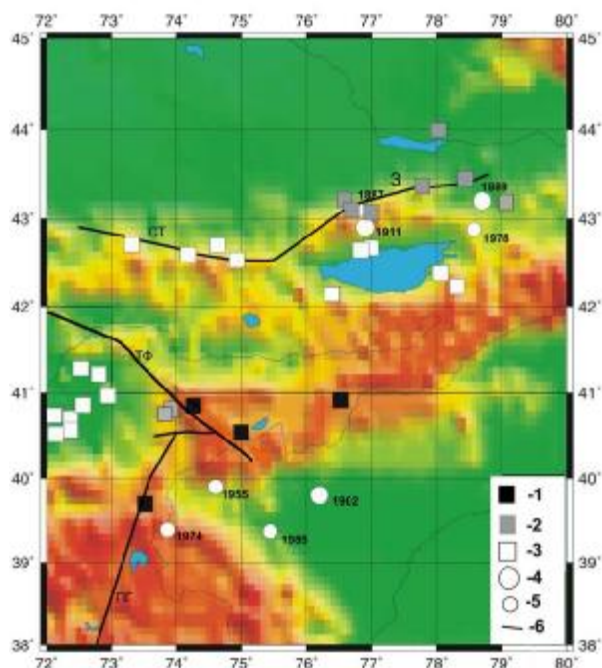
**АНАЛИЗ ДАННЫХ**

Анализ данных проведен для районов Тянь-Шаня, Монголии, Калифорнии, Японии (район Нагано), Италии (район Умбриа-Марче).

**Тянь-Шань**

На рисунке 1 показаны пункты опробования подземных флюидов и локальные величины параметра  $R'$  в районе Центрального Тянь-Шаня. Данные получены в основном в 1982 - 1988 гг. Величины  $R'$  варьируются в диапазоне 2.5 порядков. Видно, что в юго-западной и северо-восточной частях рассматриваемой территории выделяются две аномальные области - высоких и сверхвысоких значений  $R'$ . Существенно, что столь большие величины  $R'$ , которые зарегистрированы в двух источниках на Южном Тянь-Шане (4.5-4.6,  $R=$

(630-650) $\times 10^{-8}$ ), ранее встречались только в областях современного вулканизма [20]. Важно заметить, что максимальные величины  $R'$  получены в водах источников, расположенных поблизости от зон двух крупнейших глубинных разломов – Памиро-Гималайского (ПГ) и Таласо-Ферганского (ТФ).



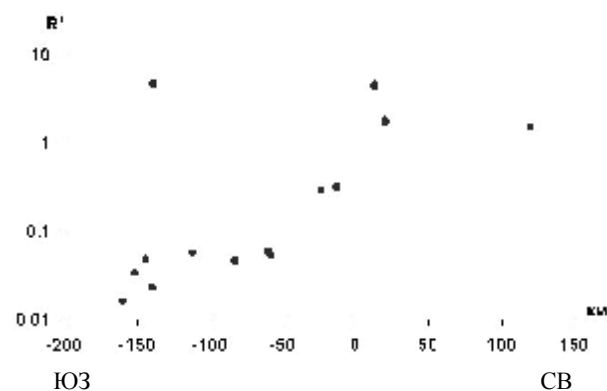
Величина  $R^*$  в пунктах опробования флюидов: 1 – 1.5 – 5.0; 2 – 0.1 – 0.5; 3 – 0.015 – 0.060. Эпицентры землетрясений: 4 –  $M \geq 8.0$ ; 5 –  $8.0 > M \geq 7.0$ . 6 – разломные зоны: СТ – Северо-Тяньшаньская, З – Заилийская, ТФ – Таласо-Ферганская, ПГ – Памиро-Гималайская

Рисунок 1. Район исследований на Тянь-Шане (по [19, 20] с авторскими дополнениями и изменениями)

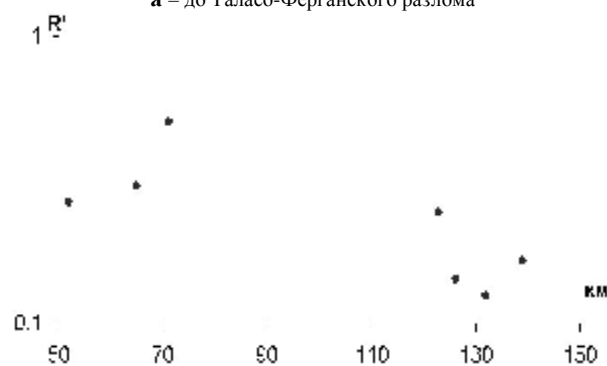
На рисунке 1 представлены также эпицентры очагов сильных землетрясений ( $M \geq 7.0$ ), произошедших с 1885 по 1988 г. Подавляющее большинство сильных землетрясений Тянь-Шаня, находящегося в условиях субмеридионального сжатия, имеет взбросовый тип механизма [36]. Обращает на себя внимание то, что повышенные и очень высокие величины  $R'$  на Северном и Южном Тянь-Шане наблюдаются вблизи очаговых зон трех сильнейших землетрясений с  $M > 8.0$ , произошедших на рубеже 19-20 веков (Чиликского, 1889; Кашгарского, 1902; Кеминского, 1911). На Южном Тянь-Шане в 1955-1988 гг. произошло девять землетрясений с  $M \geq 6.6$ , в том числе три с  $M \geq 7.0$  (Улугчатское, 1955; Маркансуйское, 1974; Кашгарское, 1985). За этот же период на Северном Тянь-Шане зарегистрировано только два землетрясения с  $M > 6.6$  (Сарыкамьшское, 1970 и Жаланаш-Тюпское, 1978).

Максимальные величины  $R'$  наблюдались в 1988 г. в водах источника Кара-Киндик, расположенного на расстоянии ~ 40 км от эпицентра Маркансуйского землетрясения 1974 г., в ~90 км от эпицентра Улугчатского землетрясения 1955 г. и на расстоянии 120-130 км

от северного участка постоянно активной памирской зоны глубокофокусной сейсмичности. На рисунке 2а представлена зависимость параметра  $R'$  от расстояния до Таласо-Ферганского разлома (ТФ на рисунке 1).



а – до Таласо-Ферганского разлома



б – до эпицентра Жаланаш-Тюпского землетрясения 1978 г. на Северном Тянь-Шане

Рисунок 2. Зависимость величины параметра  $R''$  от расстояния

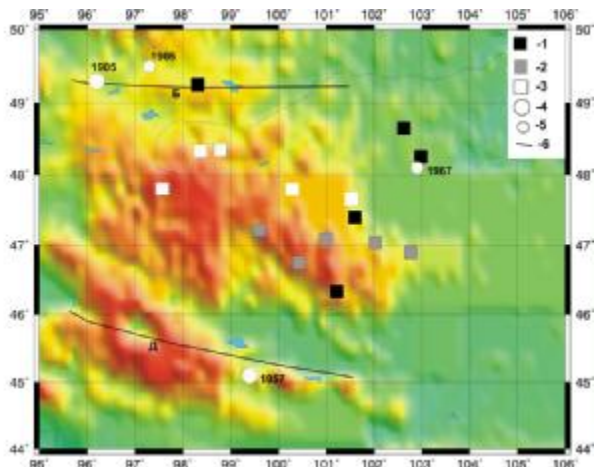
Из рисунка 2а следует, что в диапазоне расстояний 0-160 км величина  $R'$  с удалением от разлома закономерно падает как в юго-западном, так и в северо-восточном направлениях. Единственное исключение – данные источника Кара-Киндик, расположенного от разлома на удалении ~140 км. Отмечается также очень быстрое падение величин  $R'$  в районе Ферганской впадины (к юго-западу от разлома, значения менее 0.1).

Рисунок 2б иллюстрирует зависимость параметра  $R'$ , определенного для пунктов замеров в предгорьях хребта Заилийский Алатау и в Илийской впадине, от расстояния до эпицентра Жаланаш-Тюпского землетрясения 1978 г., произошедшего в районе Северного Тянь-Шаня. В диапазоне расстояний от 50 до 140 км наблюдается убывание доли мантийного гелия. При этом даже на наибольшем удалении от очага величины  $R'$  остаются выше интервала значений параметра, типичных для палеозойской коры в области неотектонической активизации Центральной Азии (верхняя граница этого интервала ~0.11 [18]). Однако, в отличие от хребта Заилийский Алатау, величины  $R'$  резко падают на сравнительно небольших расстояниях от эпицентра

Жаланаш-Тюпского землетрясения в районе Иссык-Кульской впадины. Зависимость параметра  $R'$  от расстояния до крупного регионального Заилийского разлома (З) не отмечена (рисунок 1). Для очагов сильных землетрясений, произошедших задолго до времени измерения параметра  $R'$ , не наблюдается сколько-нибудь значительного повышения доли  $^3\text{He}$  на сравнительно небольших удалениях от них. Так, достаточно низкие величины  $R'$  получены для водных источников вблизи от очаговых зон Беловодского землетрясения 1885 г. ( $M=6.9$ ), а также Кемино-Чуйского землетрясения 1938 г. ( $M=6.9$ ) в районе Северного Тянь-Шаня.

### Монголия

На рисунке 3 приведена карта района Монголии, на которой показаны пункты опробования флюидов, крупные разломные зоны и эпицентры четырех сильнейших землетрясений ( $M \geq 7.6$ ) за последние 100 лет.



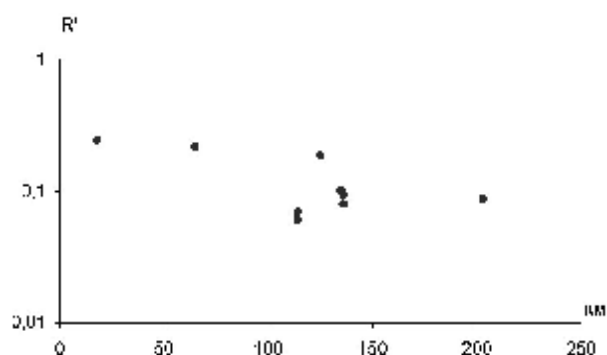
Величины  $R'$  в пунктах опробования флюидов: 1 – 0.18 – 0.30; 2 – 0.09 – 0.15; 3 – 0.03 – 0.09. Эпицентры землетрясений 4 –  $M \geq 8.0$ ; 5 –  $8.0 > M \geq 7.0$ . 6 – разломные зоны: Б – Болнайская, Д – Долиноозерская

Рисунок 3. Район исследований в Монголии (по [21] с авторскими дополнениями и изменениям)

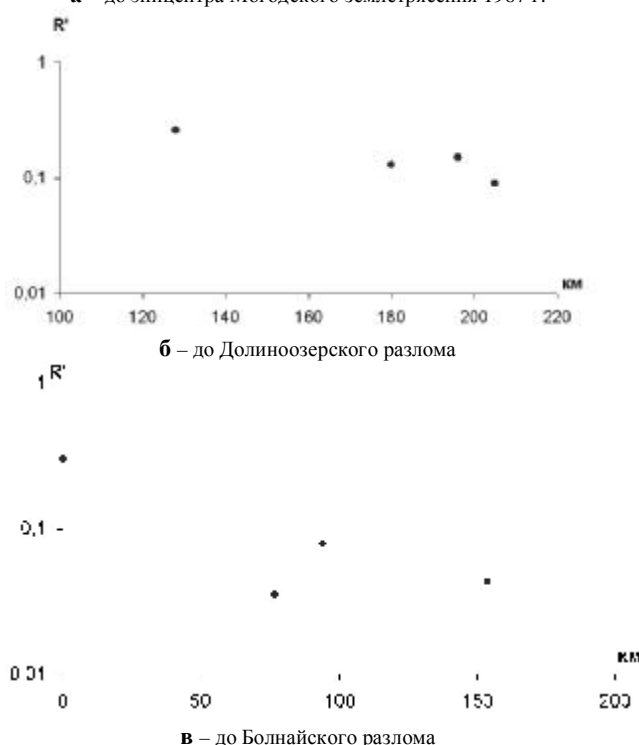
Три очага землетрясений приурочены к крупнейшим сдвиговым зонам: Цэцэрлегское 1905 г. ( $M=7.6$ ) и Болнайское 1905 г. ( $M=8.2$ ) – к Болнайской зоне, Гоби-Алтайское 1957 г. ( $M=8.1$ ) – к Долиноозерской зоне. Все эти землетрясения имели механизм типа взбрососдвига [25]. Очаг Могодского землетрясения 1967 г. ( $M=7.8$ ) не связан с известным крупным разломом. По данным о знаках первых вступлений, его механизм представляет почти чистый сдвиг. Южный фланг Байкальской рифтовой зоны, где зарегистрированы очень высокие величины параметра  $R$  (до  $10^{-5}$ ), связанные с молодым вулканизмом, а также с высокой проницаемостью земной коры для мантийных флюидов [21], не анализировался. Анализ проведен для района Хангайского сводового поднятия, сложенного позднепалеозойской корой [6].

В [21] отмечено, что для нескольких источников в районе Хангая получены существенно повышенные

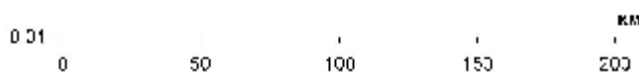
величины  $R'$  (~0.2-0.3) по сравнению со значениями, обычными для палеозойской коры. На рисунке 4а показана зависимость  $R'$  от расстояния (ось абсцисс) до эпицентра Могодского землетрясения ( $\Delta$ , км).



а – до эпицентра Могодского землетрясения 1967 г.



б – до Долиноозерского разлома



в – до Болнайского разлома

Рисунок 4. Зависимость величин  $R'$  от расстояния

Наблюдается постепенное убывание величины  $R'$  в интервале 20-210 км. Максимальные значения  $R'$  зафиксированы в 1983 и 1990 гг., т.е. через 16 лет и 23 года после этого события, на расстояниях от эпицентра ~ 20 и 65 км, соответственно.

Для нескольких источников проводились измерения величины  $R$  в разные годы. Для трех из них (Чулуту, 1982 и 1990 гг.; Ходжулин и Халун-Ус, 1978 и 1982 гг.) содержание мантийного гелия не изменилось, а для двух других (Худжиртэ и Шиберту, 1982 и 1990 гг.) заметно (на 13-15%) уменьшилось в 1990 г.

Во время Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г., одного из сильнейших на континенте за последние 100 лет, разломы вскрылись на протяжении

~300 км [25]. С учетом этого зависимость величин  $R'$  анализировалась не от эпицентрального расстояния, а от расстояния до Долиноозерского разлома, с которым связан очаг этого события. Из рисунка 4б следует, что в диапазоне расстояний до разлома 130-210 км величина  $R'$  заметно падает с увеличением  $\Delta$ . Вместе с тем, для трех пунктов на расстояниях до 200 км от разлома величина  $R'$  существенно выше, чем значения, типичные для палеозойской коры. Наибольшее содержание мантийного гелия зарегистрировано в 1983 и 1990 гг., т.е. через 26 лет и 33 года после землетрясения.

На рисунке 4в показана зависимость отношения изотопов гелия от расстояния до Болнайского разлома, с которым связаны Цэцерлегское и Болнайское землетрясения 1905 г. Видно, что довольно высокое значение  $R'$  зарегистрировано только в источнике Тошинг, расположенном непосредственно в зоне разлома. Для трех других источников на расстояниях 80 - 150 км от разлома через 70-80 лет после землетрясений получены значения  $R'$ , нормальные для палеозойской коры.

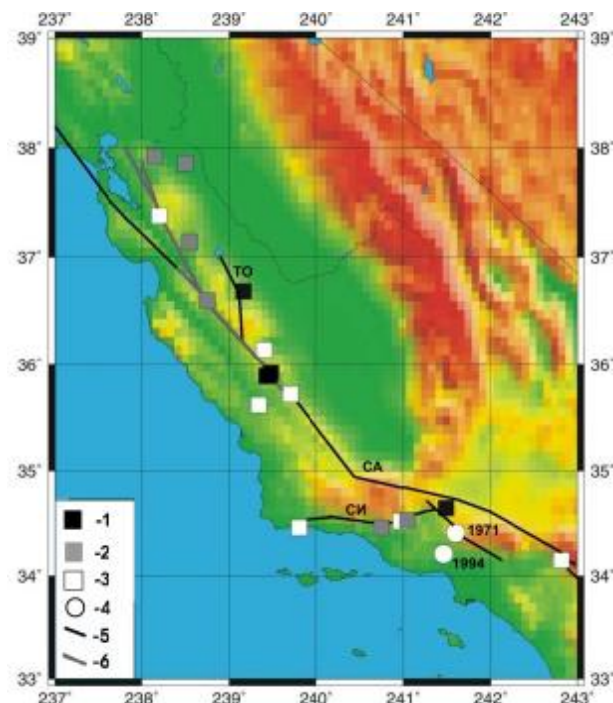
#### Калифорния

В [31] приведены данные об изотопном составе гелия в районе разлома Сан-Андреас – крупнейшего на земном шаре сдвига. Зона этого разлома в первом приближении делится на три главные части: северную и южную, где происходили сильнейшие землетрясения с  $M > 8.0$  (в 1906 и 1857 гг., соответственно), и центральную, где наблюдается постоянный крип с максимальной скоростью ~ 30 мм/год, но в то же время отсутствуют землетрясения с  $M \geq 6.0$  [35].

На рисунке 5 показано расположение источников, для которых анализировался изотопный состав гелия.

Величины  $R'$  в данном районе варьируются от 0.1 до 4.0. Из рисунка 5 следует, что наибольшие величины  $R'$  наблюдаются в центральной части разлома Сан-Андреас (СА), при одновременно достаточном большом разбросе данных ( $R'_{\max}/R'_{\min} \sim 40$ ). Наибольшие величины  $R'$  зарегистрированы в водах источника Мерси Хот Спрингс, в районе разлома Тесла-Ортигалита (ТО), на расстоянии ~ 35 км к востоку от зоны разлома Сан-Андреас. В южной части разлома Сан-Андреас величины  $R'$  в целом существенно ниже (максимум ~1.2). Корреляция между величинами  $R'$  и расстоянием до областей кайнозойского вулканизма (возрастом от 8 до 30 млн. лет [31]) не установлена.

К западу от разлома Сан-Андреас наблюдается постепенное убывание величины  $R'$  с расстоянием до него (рисунк 5). Этот тренд связан, в первую очередь, с источниками, расположенными в зоне разлома Санта-Инес. Существенно, что вблизи разлома произошли два сильных землетрясения – Сан-Фернандо ( $M=6.7$ , 1971 г.) и Нортридж ( $M=6.7$ , 1994 г.). Из рисунка 9 следует, что величины  $R'$  закономерно убывают с удалением от эпицентра землетрясения Сан-Фернандо в диапазоне расстояний ~25-175 км.



Величина  $R'$  в пунктах опробования флюидов: 1 – 1.0–4.0; 2 – 0.5–1.0; 3 – 0.1–0.5. Разломные зоны: 5 – Сан-Андреас (СА), Тесла-Ортигалита (ТО), Санта-Инес (СИ); 6 – центральная часть разлома Сан-Андреас, характеризующаяся криповыми движениями.

Рисунок 5. Район исследований в Калифорнии (по [31] с авторскими дополнениями и изменениями)

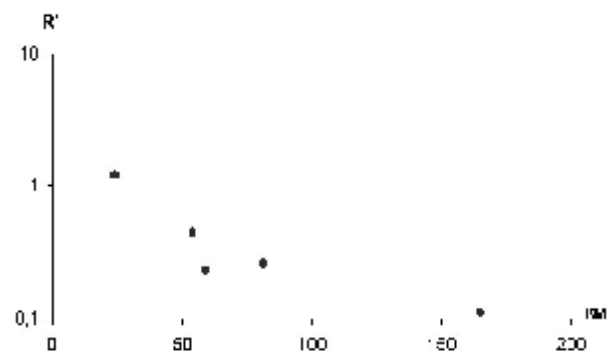
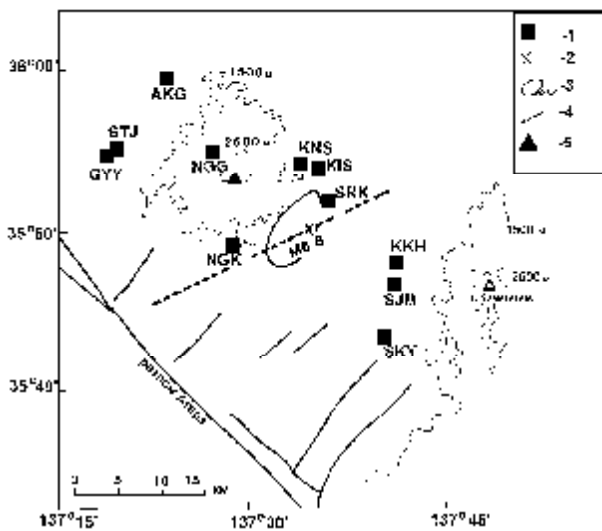


Рисунок 6. Зависимость величин  $R'$  от расстояния до эпицентра землетрясения Сан-Фернандо ( $M=6.7$ , 1971 г.)

#### Япония (район Нагано)

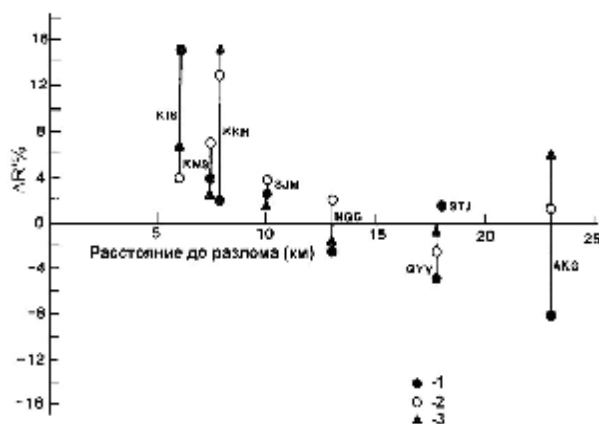
Рассматриваемый район (рисунк 10) находится в центральной части острова Хонсю. Здесь расположен действующий вулкан Онтакэ, который извергался последний раз в 1979 г. 14 сентября 1984 г. в префектуре Нагано произошло сильное землетрясение ( $M=6.8$ ), эпицентр которого находился на расстоянии ~10 км к юго-востоку от вулкана. Очаг землетрясения был близко к поверхности (глубина гипоцентра – около 2 км). Землетрясение имело механизм сдвигового типа [34].



1 – пункты опробования флюидов; 2, 3 – эпицентр и очаговая зона землетрясения 1984 г., соответственно; 4 – предполагаемая разломная зона, с которой связан очаг землетрясения; 5 – вулкан Онтакэ

Рисунок 7. Район исследований в Центральной Японии (по [34])

Замеры изотопного состава гелия проведены до и после землетрясения на ряде пунктов, удаленных до 23 км от предполагаемой линии разлома, с которым связывается очаг землетрясения (рисунок 7). Замеры, проведенные в сентябре 1981 г., через 2 года после извержения вулкана Онтакэ, показали закономерное уменьшение величин  $R'$  по мере удаления от конуса вулкана. На расстояниях до 25 км от вулкана коэффициент корреляции величин  $R'$  и  $\Delta$  составил 0.87 [34]). На рисунке 8 представлен график изменения величин  $R'$  в зависимости от расстояния до линии предполагаемого разлома в разные периоды времени по сравнению с 1981 г. Рассматривался параметр  $\Delta R'$ , определявшийся по формуле:  $\Delta R' = [(R' - R'_{1981}) / R'_{1981}] \times 100\%$ , где  $R'_{1981}$  – данные, полученные в 1981 г.



1- сентябрь 1984 г.; 2-октябрь 1984 г.; 3- апрель 1985 г.

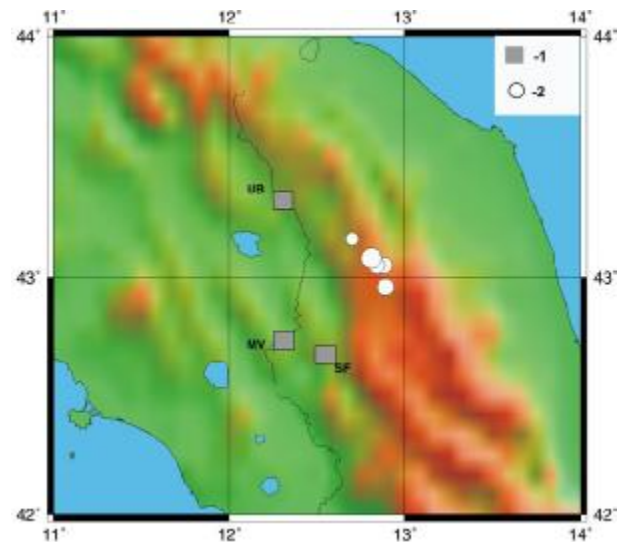
Рисунок 8. Пространственно-временные вариации параметра  $R'$  в районе Нагано (по [34])

Из рисунка 8 следует, что в сентябре 1984 г наблюдается постепенное убывание величин  $\Delta R'$  с расстоянием до разлома, что связывается с измене-

нием содержания мантийного гелия после извержения вулкана Онтакэ [34]. Видно, что только на одном пункте (KIS), ближайшем к разлому, максимальная величина  $R'$  наблюдалась в сентябре 1984 г., т.е. сразу после землетрясения ( $\Delta R' \sim 13\%$ ). На трех из четырех более далеких пунктах максимум  $R'$  соответствует замерам, проведенным в октябре 1984 г. На двух самых далеких пунктах величины  $R'$  увеличились в октябре и еще сильнее – в апреле 1985 г. (на пункте АКГ по сравнению с сентябрем 1984 г. величина  $\Delta R'$  составила 9 и 14 %, соответственно).

#### Италия (район Умбрия-Марче)

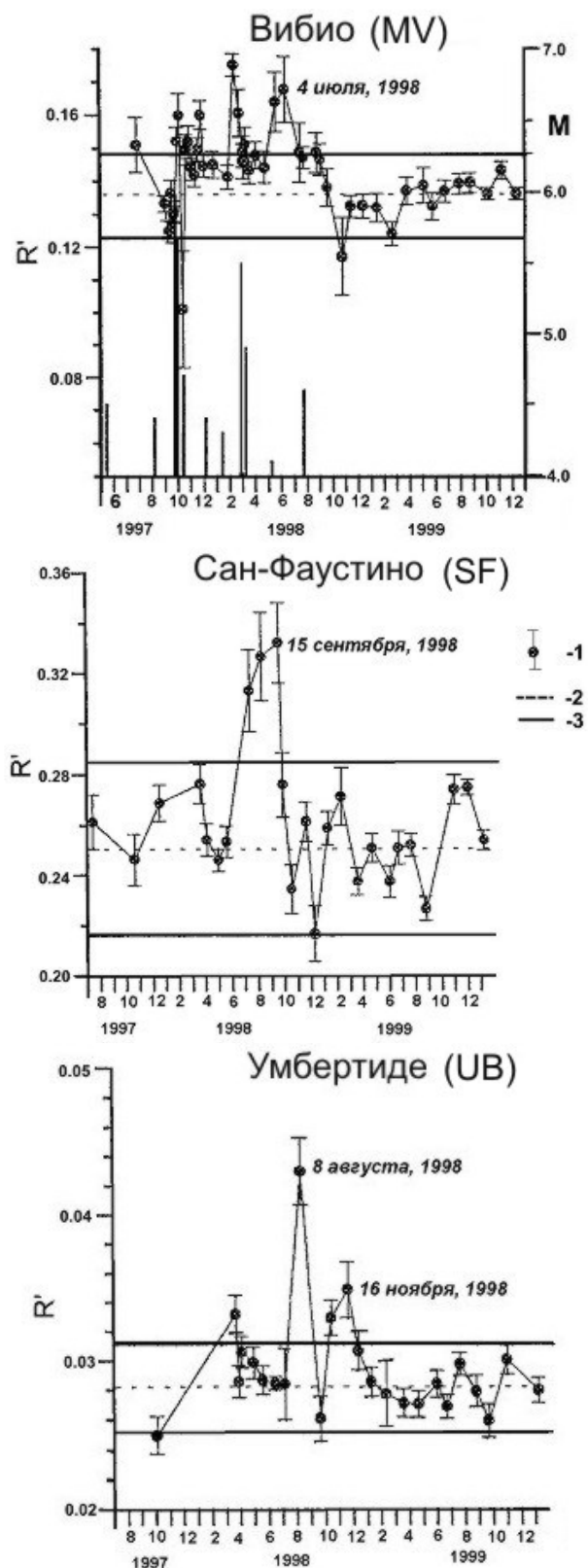
Рассматриваемый район находится в центральной части Апеннинского полуострова (рисунок 9). В 1997-1998 гг. (в основном в сентябре-октябре 1997 г.) здесь произошел рой землетрясений, из которых два сильнейших (26 сентября 1997 г.) имели магнитуду  $M_w$  5.7 и 6.0, остальные события – магнитуды от 4.0 до 5.5 [30]). Очаги землетрясений приурочены к разломам сбросового типа и к глубинам 5-10 км. Механизмы землетрясений представляют сбросы с осями растяжения, ориентированными в направлениях NE-SW и E-W.



1 – пункты опробования флюидов.  
2 – эпицентры сильнейших землетрясений роя 1997-1998 гг.

Рисунок 9. Район исследований в Центральной Италии

В трех пунктах на расстояниях  $\sim 50-60$  км от эпицентра сильнейшего землетрясения произведены замеры изотопного состава гелия с сентября 1997 по декабрь 1999 гг. (рисунок 9). На рисунке 10 показаны временные вариации величин  $R'$  за этот период, а на верхнем рисунке – магнитуды землетрясений роя ( $M \geq 4.0$ ).



1 – средние значения (по месяцам) и стандартные отклонения; 2, 3 – среднее значение и интервал  $\pm 2\sigma$  за сентябрь 1998 – декабрь 1999 гг., соответственно

Рисунок 10. Вариации параметра  $R'$  во времени на разных пунктах (по [30] с авторскими изменениями)

Видно, что на всех пунктах максимальные величины  $R'$  наблюдались в 1998 г. с существенным запаздыванием относительно времени самых сильных событий: в Вибио (MV) – в феврале, в Сан-Фаустино (SF) – в сентябре, в Умбертиде (UB) – в августе. С сентября 1997 г. по июль 1998 г. зарегистрировано также значительное увеличение суммарного выхода газов (в частности, в пункте MV в два раза по сравнению с 1999 г.). Отсюда следует, что повышенные величины  $R'$  с сентября 1997 г. по июль 1998 г. указывают на существенное увеличение абсолютного вклада мантийной компоненты гелия.

Максимальное изменение величин  $R'$  по сравнению со средними значениями, показанными пунктиром на рисунке 10, составляет ~28, 32 и 54 % в пунктах MV, SF и UB, соответственно. Наибольшие вариации величины параметра наблюдались в пункте UB, где средние величины  $R'$  в 5-9 раз ниже, чем в двух других пунктах. В пунктах SF и UB повышение величин  $R'$  носит импульсивный характер. В пункте MV нарастание величин  $R'$  имеет более размытый вид, однако, начиная с августа 1998 г., наблюдается их резкое падение, как и на других пунктах.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Имеющиеся данные убедительно свидетельствуют о присутствии мантийного гелия в близких окрестностях очаговых зон сильных землетрясений. После Рачинского землетрясения 1991 г. ( $M=6.9$ ) в районе Большого Кавказа в термоминеральных водах эпицентральной области выделена также мантийная компонента углерода [17]. Эти геохимические данные согласуются с выводами, сделанными в [9-11,29] по результатам анализа сейсмической информации, о важной роли мантийных флюидов в геодинамических процессах, связанных с сильными коровыми землетрясениями.

Другой существенный результат проведенного анализа состоит в том, что во многих случаях отмечено закономерное уменьшение величин  $R'$  с расстоянием от крупных разломных зон и очагов сильных землетрясений с разными типами подвижек, произошедших за сравнительно небольшие отрезки времени до моментов измерения изотопного состава гелия. Трудно ожидать, что такие эффекты могут быть обусловлены одновременным подъемом мантийных флюидов в больших областях радиусом до ~200 км из-за чрезвычайно низкой проницаемости (в целом) средней коры [3,7]. Гораздо естественнее предположить, что в коре существуют локальные зоны резко повышенной проницаемости, связанные с недавними сильными землетрясениями [32,33] или с крупными разломными зонами (своеобразные «зияющие дыры»). В этой связи заметим, что очаги сильных землетрясений, как правило, приурочены к пересечениям больших разломных зон [22], характеризующимся достаточно высокой проницаемостью пород [28]. Такие участки сверхвысокой проницаемости, связанные с зонами пересечения небольших разломов, обнаружены даже в слабо-

сейсмичных районах [14]. Кроме того, непосредственно при землетрясении и в результате афтершоковой деятельности в очаговых зонах и их близких окрестностях проницаемость возрастает, по крайней мере, на порядок [33]. В таких областях мантийные флюиды могут поступать под сверхгидростатическим давлением в верхнюю часть коры, что подтверждается, в частности, данными о временных вариациях скоростей поперечных волн в очаговой зоне землетрясения 1995 г. в Северном Чили ( $M=8.0$ ) [32]. Далее флюиды распространяются по трещинам в горизонтальном направлении, постепенно смешиваясь с приповерхностными водами. При этом происходит разбавление мантийного гелия радиогенным, продуцируемым в земной коре. Такой механизм предложен, в частности, для интерпретации эффекта постепенного уменьшения величин параметра  $R$  с расстоянием от вулкана Онтакэ через 2 года после извержения [34].

Из рисунков 1, 2 следует, что величины  $R'$  падают с расстоянием особенно быстро в районах Ферганской и Иссык-Кульской впадин, для которых

характерна большая мощность осадочных отложений [15]. Низкие величины  $R'$  ( $\sim 0.01-0.02$ ) зарегистрированы в районе Таримского массива, на окраинах которого мощность молодых осадочных пород во многих случаях превышает 10 км [38]. В гидротермальных водах таких районов наблюдается очень высокое содержание радиогенного гелия [20].

О распылении флюидов от очаговых зон свидетельствуют данные о пространственно-временных вариациях поглощения волн  $L_g$  [12], а также данные о макросейсмических эффектах сильных землетрясений в районе Тянь-Шаня [13].

С использованием собранных сведений проведена оценка скорости горизонтальной миграции флюидов  $V_f$  в районах Центрального Хонсю и Центральных Апеннин (таблица). Было принято, что начало распыления флюидов от очаговой зоны соответствует моменту сильного землетрясения. Для района Нагано выбраны пункты, в которых вариации величин  $R'$  в 4-10 раз превышают точность их определения.

*Таблица. Оценки величин скорости горизонтальной миграции флюидов  $V_f$*

Район	Источник	$\Delta$ , км	$\Delta T$ , лет	$V_f$ , км/год	$V_f$ , мм/с
Хонсю (Нагано)	ККН	$10^x$	$\sim 0.1$	$\sim 100$	$\sim 3$
	АКГ	$24^x$	0.6	40	1.3
Апеннины (Умбрия-Марче)	UB	$50^{xx}$	0.9	55	1.8
	SF	$52^{xx}$	0.8	65	2.1

<sup>x</sup> Расстояние от эпицентра землетрясения 1984 г. <sup>xx</sup> Расстояние от эпицентра сильнейшего землетрясения роя.

Из таблицы следует, что величины  $V_f$  варьируются в диапазоне  $\sim 1-3$  мм/с. Для сравнения отметим, что в [11] приведена скорость подъема флюидов из верхней мантии в очаговых зонах Тянь-Шаня:  $\sim 0.2-0.4$  мм/с. По данным, приведенным в [24], базальтовые магмы на глубинах 2-5 км во время извержений в рифтовой зоне Исландии текут по трещинам в горизонтальном направлении со скоростью на 2-2.5 порядка больше ( $\sim 40-50$  см/с), распространяясь на расстояния до 65 км.

Рассмотрим особенности крупных разломных зон, в окрестностях которых зарегистрированы субмантийные величины параметра  $R$ . Следует отметить, что всем им соответствуют высокие скорости смещения. Так, по геологическим данным, в юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома и в зоне Памиро-Гималайского разлома, где зафиксированы самые большие величины  $R$  в районе Тянь-Шаня, наблюдается максимальный контраст амплитуд вертикальных движений в голоцене:  $\Delta h \sim 100$  м [15]. Отсюда следует, что средняя скорость смещения крыльев разломов за 10 000 лет составляет  $\sim 1$  см/год. В центральной части сдвига Сан-Андреас максимальная скорость скольжения в результате крипа составляет  $\sim 3$  см/год [35]. Существенно, что в юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома и в центральной части разлома Сан-Андреас не зарегистрированы землетрясения с  $M > 6.0$  [8, 26]. В зоне Памиро-Гималайского разлома, поблизости от источника Кара-Киндик, также достоверно не известны события такой силы [8].

Можно полагать, что поступление ювенильных флюидов под сверхгидростатическим давлением является необходимым условием криповых движений по крупным разломам. С этим заключением согласуются и другие имеющиеся геолого-геофизические данные. Так, например, в скважине Вариан-Филипс, на расстоянии 1.4 км от главной трассы разлома Сан-Андреас (в зоне крипа) на глубине 1.5 км давление флюидов превышает гидростатическое на величину  $\sim 12$  МПа [31]. В юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома методом МТЗ обнаружена узкая вертикальная зона очень высокой проводимости, проникающая от поверхности, по крайней мере, до глубины  $\sim 40$  км. Скорее всего, она также связана с присутствием соленого водного флюида [1].

Отметим, что аномально большие величины  $R'$  в районе Южного Тянь-Шаня, вероятнее всего, связаны с существованием активных разломов, а также с очень высоким уровнем сейсмичности за несколько десятилетий, предшествовавших замерам изотопного состава.

В [11] уже отмечалось, что одна из важных функций сильных коровых землетрясений состоит в высвобождении ювенильных флюидов. Отсюда может следовать, что в областях больших скоростей скольжения крыльев разломов из-за возможности постоянного подъема мантийных флюидов просто не нужны достаточно сильные землетрясения. Аналогичный эффект наблюдается во впадинах континентальных рифтовых зон, где предполагается по-

ступление мантийной воды из-за очень высокой проницаемости пород [5] и, вместе с тем, практически отсутствуют землетрясения с  $M > 6.0$  [4].

Таким образом, подъем мантийных флюидов в зонах крупных разломов может осуществляться двумя путями – либо с помощью их постоянной медленной миграции [31], свидетельством которой являются криповые движения, либо путем эпизодических «впрыскиваний» от сильных коровых землетрясений. Оба эти процесса энергетически выгодны, поскольку ведут, в конечном счете, к уменьшению потенциальной энергии Земли. Индикатором процессов и служит присутствие мантийной компоненты гелия. Здесь существует аналогия с вулканическими извержениями, которые обеспечивают подъем к поверхности легкой расплавленной фазы и выделение огромного объема летучей фазы. Как известно, именно с действующими вулканами, а также с подводными гидротермами в районах срединно-океанических хребтов, где постоянно происходит излияния базальтовых лав, однозначно связано наиболее высокое содержание мантийного гелия [18].

Следует отметить еще, что очаги сильнейших землетрясений и вулканы, очевидно, неслучайно разнесены в пространстве. Наиболее ярко это проявляется в районах островных дуг, где практически все землетрясения с  $M > 8.0$ , приуроченные к погружающимся океаническим плитам, происходят на глубинах до 70 км, в то время как проекции вулканов на кровлю плит соответствуют глубинам  $\sim 100$  км и более [23]. Данный эффект наблюдается в меньшем масштабе, например, в Восточно-Африканской рифтовой зоне. Известно, что Западный рифт в этой зоне характеризуется высоким уровнем сейсмичности и очень слабым вулканизмом, в то время как Восточный рифт, наоборот, – слабой сейсмичностью и активными вулканическими процессами [4]. Таким образом, между сейсмичностью и вулканизмом существует своеобразное «разделение сфер влияния» в отношении подъема к поверхности легкой фазы из мантии.

*Авторы выражают признательность  
Б.Г.Поляку за предоставление данных по изотопно-  
му составу гелия для источника Кара-Киндик.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баталев В.Ю., Рыбин А.К., Щелочков Г.Г. и др. Таласо-Ферганский разлом – глубинное строение и геодинамика (на основе данных геоэлектрики)//Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. – Москва - Бишкек, 2003.- С. 180 - 189.
2. Бердичевский М.Н., Борисова В.П., Голубцова Н.С. и др. Опыт интерпретации МТ-зондирований в горах Малого Кавказа//Физика Земли. - 1996. - № 4. - С. 99 - 117.
3. Ваньян Л.Л., Хайндман Р.Д. О природе электропроводности консолидированной коры//Физика Земли.- 1996. - № 4. - С.5-11.
4. Грачев А.Ф. Рифтовые зоны Земли. - Л.: Недра, 1977. - С. 247.
5. Грачев А.Ф., Мартынова М.А. Некоторые закономерности формирования гидросферы//Вестник Ленингр. ун-та. - 1980. - № 24. - С.76 - 85.
6. Зорин Ю.А., Новоселова Р.М., Рогожина В.А. Глубинное строение территории МНР. – Новосибирск: Наука. - 1982. - С. 93.
7. Киссин И.Г. Флюидонасыщенность земной коры, электропроводность, сейсмичность//Физика Земли. - 1996. - № 4. - С. 30 - 40.
8. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. (ред.). Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. - М.: Наука, 1977. - С.535.
9. Копничев Ю.Ф., Михайлова Н.Н. Геодинамические процессы в очаговой зоне Байсорунского землетрясения 12 ноября 1990 г. (Северный Тянь-Шань)//Докл. РАН. - 2000. - Т. 373, № 1.- С. 93 - 97.
10. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н., Шепелев О.М. Временные вариации поля поглощения поперечных волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня//Докл. РАН. - 2000. - Т. 374, № 1. - С. 99 - 102.
11. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня//Физика Земли. - 2003. - № 5. - С. 73 - 86.
12. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Анализ пространственно-временных вариаций поля поглощения поперечных волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня по записям подземных ядерных взрывов //Докл. РАН.- 2004. - Т. 395, №. 6. - С. 818 - 821.
13. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации макросейсмических эффектов сильных землетрясений в районах Тянь-Шаня и Памира //Вестник НЯЦ РК. – Курчатов: НЯЦ РК, 2004. - Вып. 3. - С. 104 - 110.
14. Кочарян С.С., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. - М.: Академкнига. - 2003. - 423 с.
15. Крестников В.Н., Белоусов Т.П., Ермилин В.И. и др. Четвертичная тектоника Памира и Тянь-Шаня. - М.: Наука. – 1979. - 116 с.
16. Мамырин Б.А., Ануфриев Г.С., Толстихин И.Н. Аномальный изотопный состав гелия в вулканических газах //Докл. АН СССР. - 1969. - Т. 184, № 5. - С. 1197 - 1199.
17. Николаев А.В., Войтов Г.И., Гриневский А.О. и др. Вариации некоторых параметров водно-газовых систем месторождения минеральных вод Сартуани, обусловленные афтершоковой деятельностью Рачинского землетрясения 29 IV 1991//Докл. АН СССР. - 1992. - Т. 326, № 3. - С. 403-405.
18. Поляк Б.Г. Теплопоток из мантии в главных структурах земной коры. - М.: Наука, 1988. - 192 с.
19. Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. и др. Изотопный состав гелия, неона и аргона в подземных флюидах Тянь-Шаня//Геохимия.- 1989. - № 1. - С. 87 - 98.
20. Поляк Б.Г., Каменский И.Л., Султанходжаев и др. Субмантийный гелий во флюидах юго-восточного Тянь-Шаня//Докл. АН СССР. - 1990. - Т. 312, № 3. - С. 721 - 725.
21. Поляк Б.Г. Изотопы гелия в подземных флюидах Байкальского рифта и его обрамления (к геодинамике континентального рифтогенеза)//Российский журнал наук о Земле. - 2000. - Т. 2, № 2.
22. Рогожин Е.А. Тектоника очаговых зон сильных землетрясений Северной Евразии конца XX столетия //Российский журнал наук о Земле. - 2000.- № 2 (1). - С. 37 - 62.



23. Уеда С. Новый взгляд на Землю. - М.: Мир. - 1980. - С. 214.
24. Федотов С.А. (ред.) О подъеме основных магм в земной коре и механизме трещинных базальтовых извержений//Физика Земли. - 1976. - № 10. - С. 5 - 23.
25. Флоренсов Н.А., Солоненко В.П. Гоби-Алтайское землетрясение. - М.: Изд-во АН СССР. - 1963. - С. 391.
26. R Burford, P. Harsh Slip on the San Andreas fault in Central California from alignment array surveys//Bull. Seismol. Soc. Amer. - 1980. - N 4. - P. 1233 - 1262.
27. H. Craig, J. Lupton Primordial neon, helium and hydrogen in oceanic basalts//Earth Planet. Sci. Lett. - 1976. - V. 31. N 3. - P. 369 - 385.
28. D. Curewitz, J. Karson Structural settings of hydrothermal outflow: fracture permeability maintained by fault propagation and interaction//J. Volcanol. Geotherm. Res. - 1997. - V. 79. - P. 149 - 168.
29. S. Husen E. Kissling Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile //Geology. - 2001.- v. 29, N 9. - P. 847 - 850.
30. F. Italiano, G. Martinelli, P. Nuccio Anomalies of mantle-derived helium during the 1997-1998 seismic swarm of Umbria-Marche, Italy//Geophys. Res. Lett. - 2001. - V. 28, N 5. - P. 839 - 842.
31. B. Kennedy, Y. Kharaka, W. Ewans et al. Mantle fluids in the San Andreas fault system, California//Science. - 1997. - 278. - P. 1278 - 1281.
32. A. Koerner, E. Kissling, S. Miller A model of deep crustal fluid flow following the Mw=8.0 Antofagasta, Chile, earthquake//J. Geophys. Res. - 2004. - V. 109, N B6. DOI 10.1029/2003JB002816.
33. S. Rojstaczer, S. Wolf Permeability changes associated with large earthquakes: an example from Loma Prieta, California//Geology.- 1992. - V.20. - P. 211 - 214.
34. Yu. Sano, Yu. Nakamura, H. Wakita et al.  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio anomalies associated with the 1984 Western Nagano earthquake: possibly induced by a diapiric magm//J. Geophys. Res. - 1986. - V. 91, N B12. - P. 12291 - 12295.
35. C. Scholz, M. Wyss, S. Smith Seismic and aseismic slip on the San Andreas fault//J. Geophys. Res. - 1969. - V. 74, N 8. - P. 2049 - 2069.
36. P. Tapponnier, P. Molnar Active faulting and cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baikal regions //J. Geophys. Res. - 1979. - V. 84. - P. 342 - 3459.
37. K. Tiampo, J. Rundle, S. McGinnis et al. Eigenpatterns in southern California seismicity//J. Geophys. Res.- 2002. - V. 107, N B12.
38. S. Xu, S. Nakai, H. Wakita et al. Helium isotope compositions in sedimentary basins in China//Appl. Geochem. - 1995. - V. 10. - P. 643 - 656.

**ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕР ОШАҚТАРЫНЫҢ ЖӘНЕ ІРІ ЖАРЫЛЫМДЫ БЕЛДЕМДЕРІНІҢ  
АУДАНЫНДАРЫНДА МАНТИЯЛЫҚ ФЛЮИДТЕРІНІҢ КӨТЕРІЛУІ: ГЕОХИМИЯЛЫҚ АЙҒАҚТАР**

<sup>1</sup>Копничев Ю.Ф., <sup>2</sup>Соколова И.Н

<sup>1</sup>РҒА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасының институты, Мәскеу, Ресей

<sup>2</sup>ҚР ҰҰА Геофизикалық зерттеулер институты, Алматы, Қазақстан

Қатты жерсілкінулерінің ошақ белдемдері жанында, сондай-ақ кейбір ірі жарылымдар белдемдерінің төңіректерінде (Тянь-Шань, Монғолия, Калифорния, Орта Хонсю және Орта Аппениндер аудандары) жер астындағы флюидтерде гелий изотопы (параметр  $R = ^3\text{He}/^4\text{He}$ ) болу қатынастарының вариациялары туралы әдебиетті деректер талдануда. Оқиғалардың көбінесінде қатты жерсілкінулер эпиорталықтарынан және ірі аумақтық жарылымдар белдемінен алыстауымен R параметрдің заңды түрде кемуі байқалатыны көрсетілген. Анықталған заңдылық қатты жерсілкінулерден кейін, сондай-ақ аса жоғары өтімділігімен сипатталатын кейбір жарылымды белдемдерінде мантиялық флюидтері жер қыртысының жоғары жағына көтерілетінің, және кейінде олар горизонтальды бағытында жайылу айғағы ретінде дәлелденеді.

**MANTLE FLUIDS ASCENT IN THE REGIONS OF STRONG EARTHQUAKE SOURCES  
AND LARGE DEEP FAULT ZONES: GEOCHEMICAL EVIDENCES**

<sup>1</sup>Yu.F.Kopnichev, <sup>2</sup>I.N. Sokolova

<sup>1</sup>Institute of Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Data on variations of a ratio of the helium isotope content (parameter  $R = ^3\text{He}/^4\text{He}$ ) near the sources of strong earthquakes and some large fault zones (in the regions of Tien Shan, Mongolia, California, Central Japan and Central Apennines) are being analyzed. It was shown that in many cases R values regularly diminish with the distance from epicenters and large regional faults. This testifies to the ascent of mantle fluids into the earth's crust after strong earthquakes and in some deep fault zones, which are characterized by superhigh permeability and their further migration in horizontal direction.