

УДК 552.321.1/553.212

Г.А. ВАЛУЙ

## Уникальные объекты дифференциации магматических расплавов в гранитных интрузивах морского побережья Приморья

*Дана характеристика уникальных геологических объектов – зон расслоения гранитных расплавов, обнаруженных автором при изучении гранитных массивов приморского побережья Японского моря. Выявлен широкий спектр механизмов расслоения гранитных расплавов: кристаллизационная дифференциация с осаждением кристаллов плагиоклаза, двойная диффузионная конвекция («d-d» эффект), флюидно-магматическая дифференциация, вызванная процессом, сходным с динамической кавитацией при заполнении магматической камеры, что привело к образованию округлых включений (автолитов), характерных для всех гранитных массивов, и расслоение остаточных расплавов, богатых летучими компонентами.*

*Ключевые слова: граниты, включения, автолиты, дифференциация и расслоение расплавов, остаточные расплавы, летучие компоненты.*

**Unique objects of differentiation of magmatic melts in granite intrusions of the sea coast of Primorye.**  
G.A. VALUI (Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

*The paper describes the unique geological objects – zones of stratification of granite melts that the author found when studying the granite massifs of the Primorsky coast of the Sea of Japan. A wide spectrum of stratification mechanisms of granite melts has been revealed: crystallization differentiation with precipitation of plagioclase crystals, double diffusion convection (“d-d” effect), fluid-magmatic differentiation caused by the process similar to the dynamic cavitation during the filling of a magmatic chamber resulted in the formation of the rounded inclusions (autoliths) typical for all granite massifs, differentiation of residual melts rich in volatile constituents.*

*Key words: granites, enclaves (inclusions), autoliths, differentiation and stratification of melts, residual liquors, volatile constituents.*

Многолетние детальные исследования крупнейших гранитных интрузивов Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса, прекрасно обнаженных в береговых скалах морского побережья Приморья (рис. 1), привели автора и ее коллегу С.А. Коренбаума к выводу о том, что многочисленные неоднородности, наблюдаемые в них (округлые включения гранодиоритов, биотит-роговообманковые полосы, шлировые пегматиты, аплиты-пегматитовые тела и пр.), являются результатом сложных процессов, которые происходили в расплаве до его окончательного затвердевания и которые сохранились благодаря относительно быстрой кристаллизации расплавов в условиях малых глубин – менее 3–4 км. Детальная характеристика этих интрузивов приведена в работах автора [1, 4, 6] и в настоящей статье не приводится, учитывая ее ограниченный объем. Здесь внимание читателей привлекается к уникальным объектам, в которых проявлены процессы расслоения магматических расплавов при кристаллизации изучаемых интрузивов.

В изученных интрузивах впервые установлены (обнаружены и изучены) проявления следующих механизмов дифференциации расплавов на магматической стадии:

---

ВАЛУЙ Галина Александровна – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток). E-mail: gvalui@mail.ru

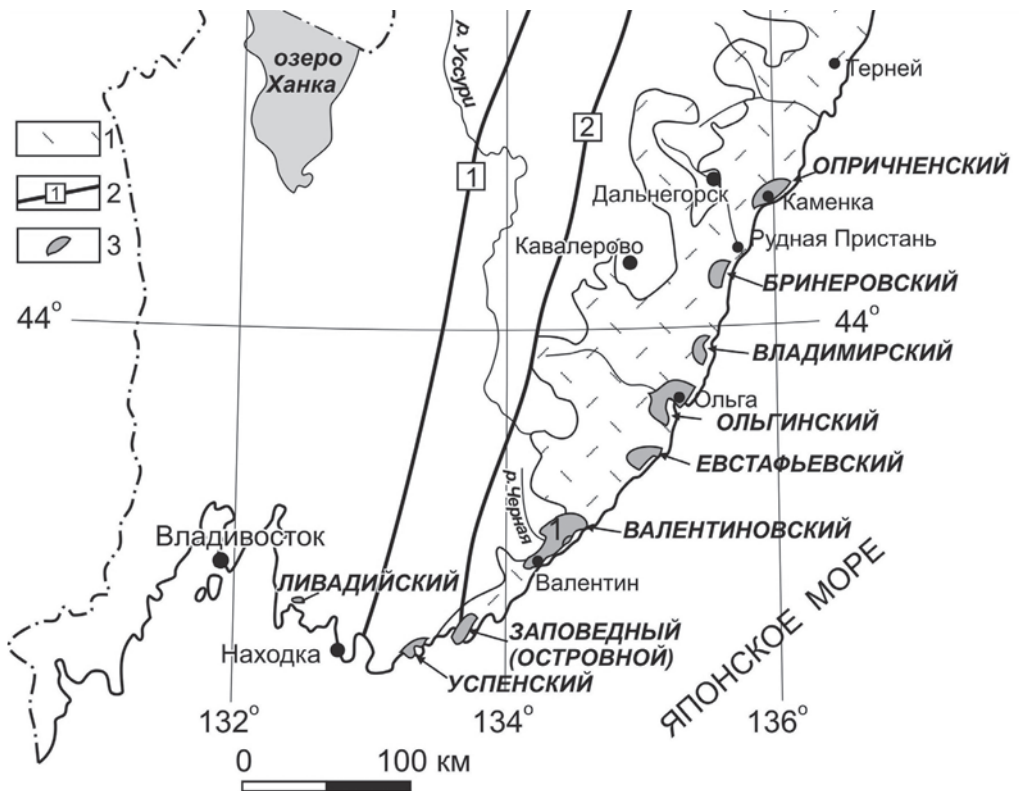


Рис. 1. Схема размещения гранитных интрузивов с зонами расслоения на приморском побережье: 1 – вулканы Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса; 2 – главные разломы (1 – Арсеньевский, 2 – Центральный); 3 – интрузивы

а) кристаллизационная дифференциация с отсадкой плагиоклаза в областях конвективных потоков, приведшая к образованию зоны ритмично-расслоенных гранитов в Оприченском массиве; б) флюидно-магматическое расслоение, вызванное процессом, подобным динамической кавитации при дегазации маловодных магм в момент заполнения магматической камеры, которое привело к образованию округлых включений мелкозернистых пород (автолитов), столь характерных для гранитоидов вулканических ассоциаций; в) диффузионно-магматическое расслоение, вызвавшее образование субгоризонтальных ритмов гранофир-аплитовых пород, обусловленное возникновением механизма, подобного двойной диффузионной конвекции («d-d» эффект) в зонах резкого градиента температур (Бринеровский массив); г) расслоение остаточных расплавов, богатых летучими компонентами, приведшее к образованию в дайкообразном теле гранодиоритов ритмично повторяющихся полос темноцветных минералов (Владимирский массив) и дифференцированных даек аплито-пегматитов, обогащенных гнездами темноцветных минералов, наиболее широко проявленных в Ольгинском массиве.

1. *Кристаллизационная дифференциация в областях конвективных потоков.* Она привела к образованию зон ритмично-расслоенных гранитов. Зона была обнаружена в центральной части южного поля гранитов в Оприченском массиве – рис. 1, 2 (т. 244–261), 3.

Сам Оприченский массив является прекрасным примером зонального интрузива, в котором четко проявлены 3 части: южная и северная сложены гранитами (с возрастом 56–57 млн лет) и центральная, сложенная диоритами (66 млн лет). В прибрежных скалах можно наблюдать красивый контакт диоритов с гранитами (рис. 2, т. 290).

Южная часть интрузива представляет из себя лакколит, в свою очередь, состоящий из трех зон: 1 – приконтактной, сложенной гранофировыми гранитами с автолитами

(протяжением 4 км); 2 – зоной полосчатых гранитов (протяжением 3–3,5 км), отделяющей приконтактную зону относительно быстрой кристаллизации от 3-й – центральной части, где происходило перемешивание расплава, что и привело к образованию крупнозернистых гранитов с гнездами аплит-пегматитов [4].

Зона расслоения сложена порфировидными гранитами с чередующимися полосами светло- и темно-серого цвета. Каждая темно-серая и лежащая над ней светлая полоса составляют один ритм. Переход от темно-серой к светлой внутри ритма постепенный, а контакт между светлой и вышележащей темно-серой (между ритмами) резкий. Мощность светлых полос около 10–20 см, а темных – 60–90 см. Общая мощность каждого ритма не превышает 1 м, а всей зоны – 2–2,5 м и более, количество в разрезе от 3 до 7, а протяженность зоны до 3,5 км (рис. 3).

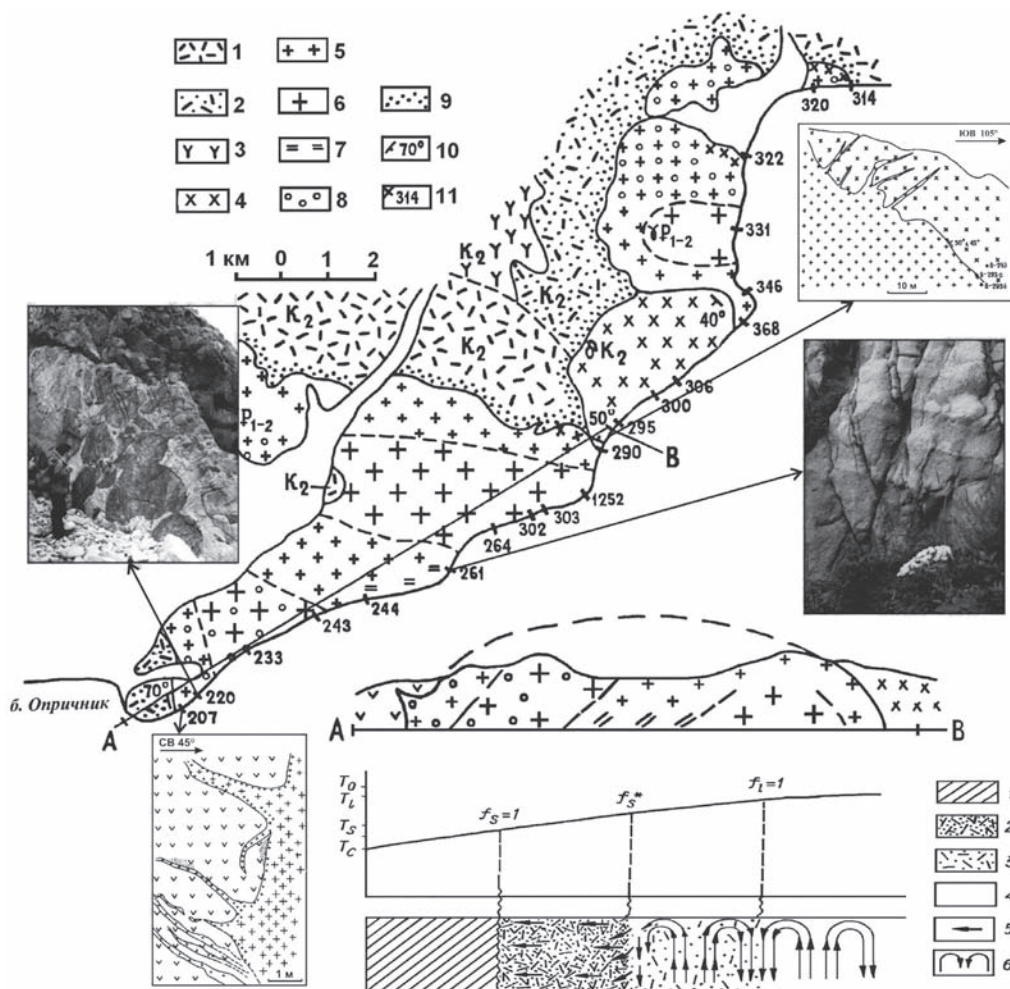


Рис. 2. Геологическая карта Опричненского массива с врезками фотографий включений, полосчатых гранитов и зарисовок контактов пород по [1]: 1 – лавы; 2 – туфы; 3 – туфолавы риолитов; 4 – диориты; 5–8 – граниты: 5 – гранофировые, 6 – крупнозернистые, 7 – полосчатые, 8 – с включениями; 9 – приконтактная гранит-порфировая фация; 10 – направление и угол падения контактов; 11 – места взятия образцов. Внизу под разрезом южного поля гранитов по линии АВ – схема фаз в эндоконтакте интрузива и распределение молярных потоков компонентов в жидкости при затвердевании расплава в интервале температур ликвидуса ( $T_l$ ) и солидуса ( $T_s$ ) при начальной температуре жидкости  $T_0$  и температуре контакта  $T_k > T_s$  по [1]: 1 – изверженная порода (твердая зона); 2 – твердо-жидкая зона; 3 – жидко-твердая зона; 4 – жидкость, где отсутствуют зародыши кристаллов; 5 – направление термомонвекционных потоков расплава, вызванных усадкой; 6 – потоки свободной конвекции

Цвет полос обусловлен различием в составе пород: более светлые и маломощные несколько обогащены кварц-полевошпатовыми сростками (гранофировая структура), тогда как в более темных и более мощных наблюдается обогащение кристаллами плагиоклаза, особенно заметное в нижних частях ритмов [1, 4–6]. В свежих породах полосы почти не отличаются друг от друга, а на выветрелой поверхности они становятся лучше различимыми по слегка заметному оттенку. Спустя 35 лет мне удалось вновь побывать на этих обнажениях. С удивлением я обнаружила, что в большинстве скалистых обнажений полосы с преобладанием кварц-полевошпатовых гранофировых сростков окрашены в розово-бурый цвет, подобно тому, что происходит при искусственном окрашивании петрографических шлифов для диагностики полевых шпатов (рис. 3). В других гранитных интрузивах побережья столь интенсивного химического выветривания не наблюдалось. Остается предположить, что Опричненский массив «пострадал» из-за близости Дальнегорского химического комбината, который расположен всего в 30–35 км по прямой.

2. *Флюидно-магматическое расслоение.* В результате его, по мнению автора, возникли микрогранодиоритовые округлые включения (автолиты) с резкими границами диаметром от 10–30 до 100 см (рис. 4). Включения в гранитах могут быть одиночными, но могут образовывать скопления в форме линз или горизонтов. Иногда наблюдаются целые фации «конгломератовидных» пород, в которых включения составляют до 60–70 % объема породы и размер которых увеличивается при удалении от контактов и кровли интрузива (рис. 5).

Гранодиоритовые включения всех типов обладают характерной магматической структурой, присущей только им и не встречающейся в породах аналогичного состава в другом геологическом залегании. Нередко включения зональны: центральные части их более

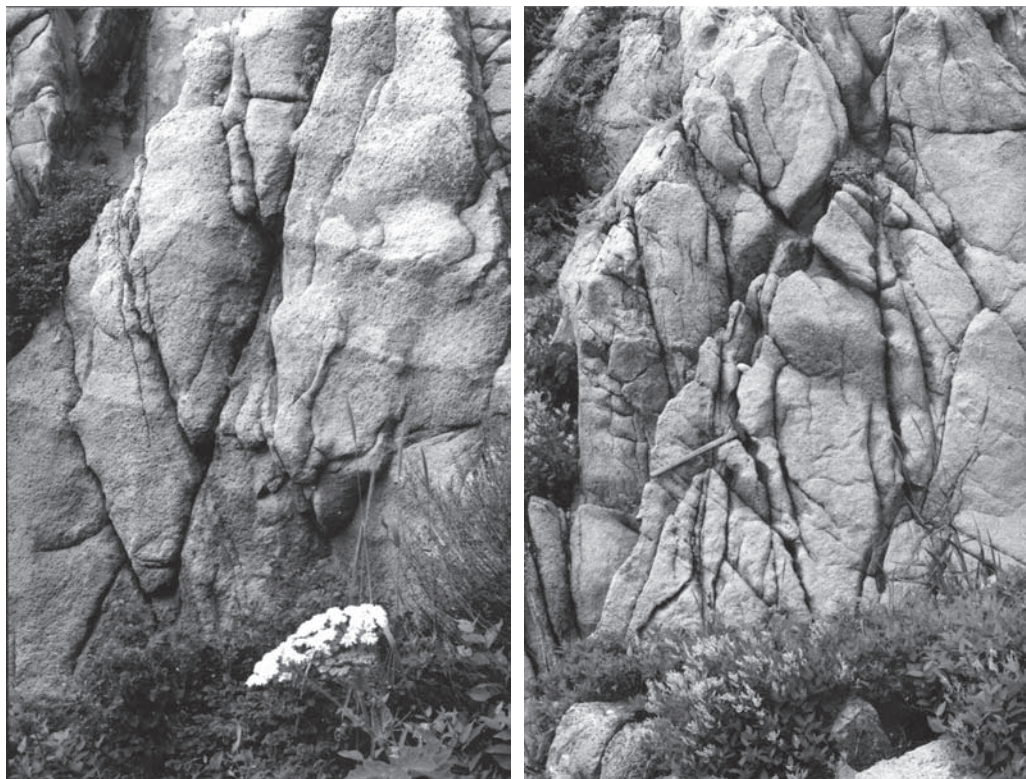


Рис. 3. Полосчатые граниты Опричненского массива – редчайший пример проявления кристаллизационной дифференциации и оседания кристаллов плагиоклаза в гранитной магне (слева – фото 1965 г., справа – граниты, окрашенные химическим выветриванием, фото 2001 г.). Здесь и далее фотографии автора

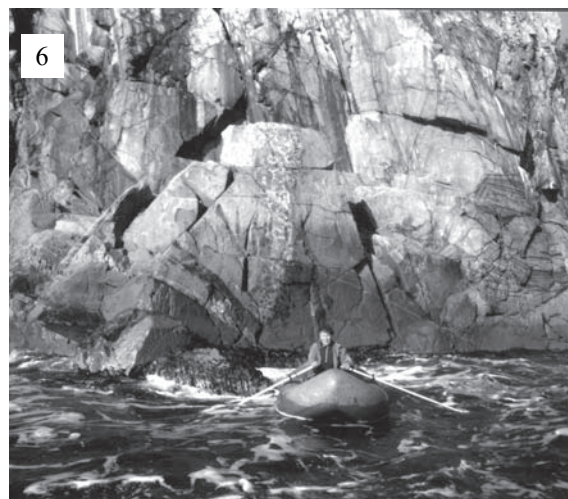
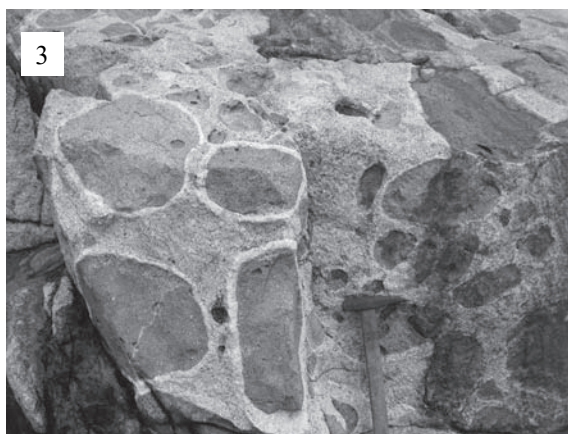
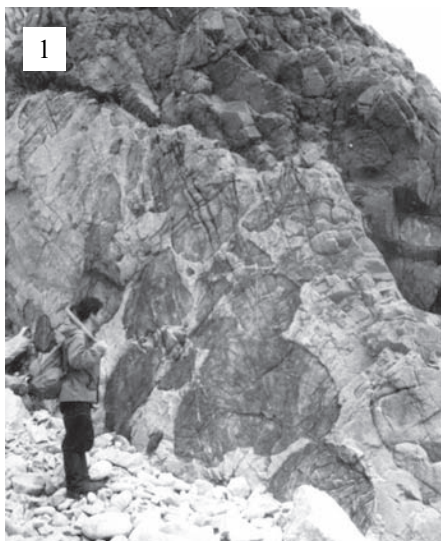


Рис. 4. Включения (автолиты): 1 – в гранитах, 2 – в диоритах, Опричненский массив; 3 – в гранодиоритах с белой оторочкой, 4 – с зоной «закалки», Успенский массив; 5 – зональное в гранодиоритах, Бринеровский массив; 6 – скопления мелких включений в дайке аплитов-пегматитов, Ольгинский массив

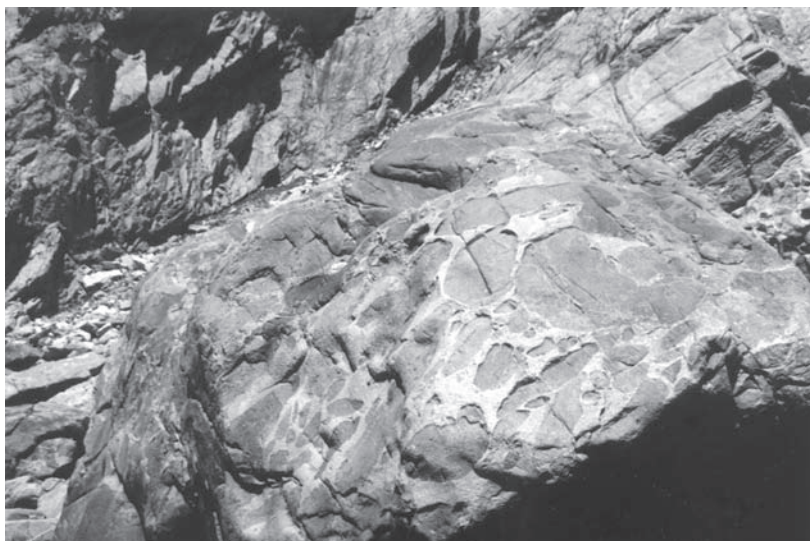


Рис. 5. «Конгломератовидные» гранодиориты, Валентиновский массив

крупнозернистые, чем краевые, похожие на зоны закалки дайковых пород (рис. 4). Для краевых зон некоторых включений характерна ориентировка плагиоклаза вдоль контакта. Включения различной зернистости нередко встречаются в одном обнажении, и более мелкозернистые из них срезают контакты среднезернистых включений с гранитами. В целом состав включений колеблется от гранитов до кварцевых диоритов и отчетливо коррелирует с составом вмещающих гранитов: в гранитах они гранодиоритовые, в гранодиоритах – кварцеводиоритовые и т.д. Колебания в составе включений из одного обнажения при одном и том же составе гранитов могут быть значительными. Степень контрастности состава пары гранит–включение увеличивается от приконтактных частей массива к центральным и от малоглубинных массивов к более глубинным [3, 4].

Минералогия включений довольно однообразна: зональный плагиоклаз составляет от 40–50 до 70 % объема породы, кварц – 10–20 %, калишпат – 1–3 % (иногда до 17 % во включениях микросферолитовой структуры), биотит – от 4–5 до 20 % и роговая обманка – от 3–5 до 10 %. По сравнению с вмещающими гранитами они обогащены апатитом, магнетитом, сфеном и ортитом. Включения более пористые и менее плотные по сравнению с породами аналогичного состава, но другого геологического положения. Это свидетельствует о большем флюидосодержании в этих образованиях, что подтверждается и прямыми определениями количества флюидной фазы [4].

Благодаря хорошей обнаженности на побережье удалось подметить такие особенности включений, как (1) зависимость состава от состава содержащих их пород и от положения внутри массива (расстояния до контактов); (2) своеобразие их структурного облика, характерного только для них и не наблюдающегося в породах такого же состава, но в другом геологическом положении; (3) отсутствие следов воздействия гранитов на породу включений, (4) возрастание размеров включений от диоритов к гранитам, т.е. в зависимости от вязкости магматических расплавов, (5) подобие распределения редкоземельных элементов и (6) возрастание первичных отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  с одновременным уменьшением отношений  $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ . Все это приводит автора к выводу о закономерности появления включений в малоглубинных гранитах и о их возникновении на месте кристаллизации (in situ).

Вопрос о происхождении включений до сих пор остается дискуссионным. Одни исследователи относят их к автолитам, т.е. продуктам эволюции той же магмы, что и вмещающие граниты, по-разному определяя время их появления – на ранних или поздних стадиях кристаллизации гранитоидов. Другие считают включения ксенолитами глубинных пород

или обломками ранней фазы. Третьи полагают, что включения являются результатом смешения различных магм [3, 4].

По мнению автора, включения являются автолитами, появляющимися в результате флюидно-магматической дифференциации «маловодных» магм, вызванной процессом, подобным динамической кавитации при дегазации расплава в момент заполнения магматической камеры. Возникновению автолитов способствует низкое исходное содержание флюидов, отсутствие разгерметизации магматической камеры и перемешивания расплава. Ранее в геологической науке процессы, подобные кавитации, для магматических расплавов не рассматривались [2, 3, 4, 7].

3. *Диффузионно-магматическое расслоение.* Оно привело к образованию субгоризонтальных ритмов гранофир-аплитовых пород и сопровождалось некоторым обогащением аплитовых ритмов  $H_2O$ , а гранофировых –  $(FeO + Fe_2O_3)$  до 8–10 % (рис. 6). Мощность ритмов 100–150 см, протяженность более 150 м, количество в разрезе до 10–14. Каждый ритм состоит из более темной серой полосы мощностью 10–15 см, сменяющейся светло-серой полосой мощностью 100–140 см. Цвет полос обусловлен различием в структуре породы: темно-серые являются более мелкозернистыми и в них преобладает гранофировая структура основной массы порфирированных пород, а в светло-серых и более мощных – аплитовая структура. Гранофировые полосы имеют более низкое содержание  $SiO_2$  (70–72 %), тогда как в аплитовых частях оно возрастает до 73–75 %. Очень показательным различием в содержании общего железа, и особенно FeO: в гранофировых зонах оно достигает 6–7 %, тогда как в аплитовых не превышает 2–3 %, как и «положено» гранитам. Итак, гранофировые слои обеднены флюидной фазой, обогащены  $(FeO + Fe_2O_3)$ , аплитовые – несколько обогащены водой, хотя в целом вся зона характеризуется пониженным количеством флюидной фазы [4, 8]. Таким образом, благодаря резкому термическому градиенту в условиях малых глубин в приконтактовых частях интрузивов могут возникать условия для протекания процесса, подобного двойной диффузионной конвекции, которая приводит к формированию в расплаве субгоризонтальных ячеек с различным содержанием  $H_2O$  и  $(FeO + Fe_2O_3)$ . При кристаллизации этого расслоенного расплава образуется порода с различной структурой: из обедненного водой расплава – гранофировые слои, из несколько обогащенного флюидами – аплитовые. Гранофировые слои представляют из



Рис. 6. Ритмично-расслоенные граниты Бринеровского массива. Вечернее освещение скал на правом фото выявило большую «стойкость» гранофировых ритмов к выветриванию

себя своеобразную границу, через которую осуществляется диффузионный массообмен между ячейками и которая поэтому обогащена железом (утяжеляющим компонентом) как наименее подвижным в гранитном расплаве [4, 8]. В гидродинамике подобный процесс называется двойной диффузионной конвекцией («d-d» эффект). Наблюдается подобное расслоение в прикровлевой части турмалинсодержащих гранитов поздней фазы Бринеровского массива (рис. 6).

4. *Расслоение остаточного расплава, богатого летучими компонентами.* Им вызвано образование дифференцированных аплито-пегматитов и дайкообразного тела ритмично-слоистых гранодиоритов во Владимирском массиве.

В дифференцированных аплито-пегматитовых телах наблюдается локализация аплитов в лежачем, а пегматитов с гнездами темноцветных минералов – висячем боку при пологом залегании. В крутопадающих телах этого типа гнезда темноцветных минералов и пегматитов ориентированы перпендикулярно к контактам тел (рис. 7, внизу). Пологие и крутопадающие тела сопровождаются всером меланократовых полос во вмещающих

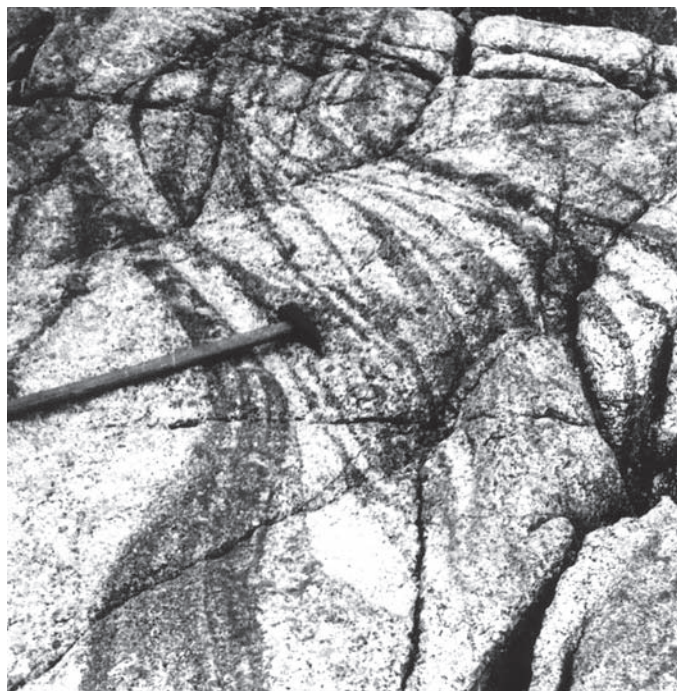


Рис. 7. Дифференцированное аплито-пегматитовое тело с гнездами темноцветных минералов и шлейфом меланократовых полос во вмещающих гранитах. Ольгинский массив, вблизи мыса Мраморный (вверху – вертикальный разрез, внизу – горизонтальная поверхность)



гранитах (рис. 7, вверху). Мощность этих тел колеблется от 0,5 до 1,5 м, протяженность – десятки метров. Наиболее широко проявлены в Ольгинском и Владимирском массивах.

Ритмично-слоистое тело гранодиоритов Владимирского массива наблюдается южнее мыса Баратынского. Оно залегает в крупнозернистых гранитах, протягиваясь вдоль берега моря более чем на 900 м при мощности от 0,5 до 5 м. Азимут падения его  $290-295^\circ$ ,  $< (10-15^\circ)$ , совпадает с системой трещин отдельности в массиве. Полосчатость обусловлена неравномерным распределением темноцветных минералов в породе (рис. 8). В пределах тела наблюдаются полосы, обогащенные биотитом, роговой обманкой и магнетитом, мощностью от 1–3 до 5 см. Полосы располагаются в целом параллельно друг другу на расстоянии от 2 до 10–15 см, а в центре немного реже. В средней части зоны количество темноцветных минералов нарастает к середине каждой полосы, тогда как в верхней части увеличение количества темноцветных происходит снизу вверх, а в нижней – сверху вниз (как при осаждении кристаллов). Полосчатая зона венчается пегматитовой полосой мощностью 10–15 см. Содержание темноцветных минералов во вмещающих гранитах за

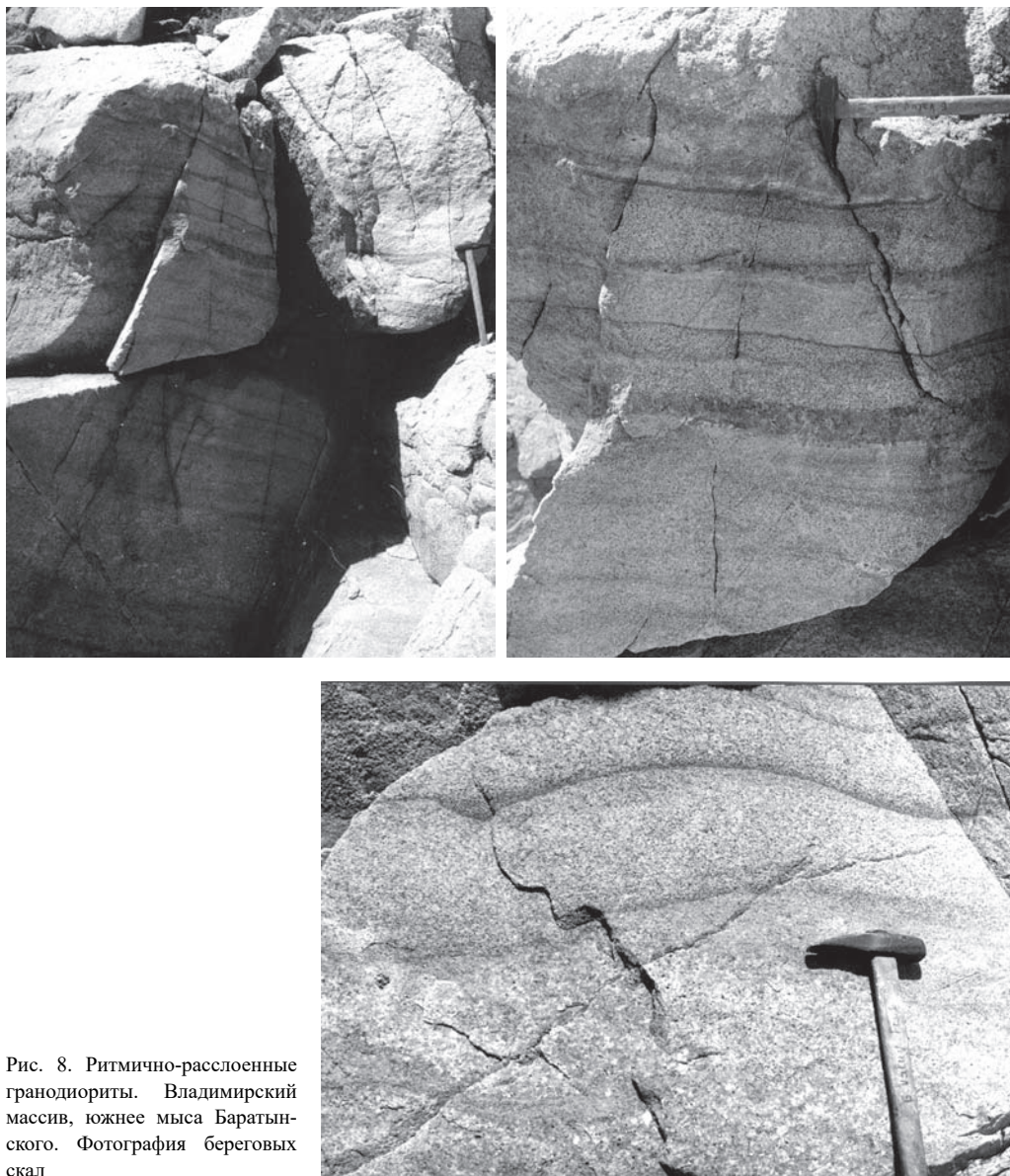


Рис. 8. Ритмично-расслоенные гранодиориты. Владимирский массив, южнее мыса Баратынского. Фотография береговых скал

пределами зоны составляет около 9 %, над зоной – 3 %, в гранодиоритах тела между полос – 5–9 %, в полосах – от 9 до 21 %.

Уникальный пример полосчатости на контакте разных пород наблюдается в южной части мыса Маневского – Ольгинский интрузив. Биотит-роговообманковая полосчатость развита на контакте гранодиоритов (верхняя часть обнажения) и прорывающих их гранитов (ниже меланократовых полос) – рис. 9.

В южной части прибрежной зоны Приморья находится еще один из интереснейших интрузивов – Валентиновский массив гранитоидов, протянувшийся вдоль побережья Японского моря более чем на 50 км от устья р. Черная до мыса Белявского на юге. Он весь (как и Опричненский) может считаться уникальным объектом – так много в нем интересных контактов между слагающими его породами (фазами) и зон дифференциации. Некоторая часть таких примеров показана на врезках карты (рис. 10).

Подробное описание их можно найти в монографии автора [4], а здесь – только их перечисление (с северо-востока на юго-запад): 1 – аплито-пегматитовое тело, обогащенное включениями, прорывает зону меланократовых гранодиоритов [4, с. 64]; 2 – контакт щелочных гранитов с гранодиоритами [4, с. 70]; 3 – контакт гранодиоритов с породами кровли массива [4, с. 63]; 4 – контакт пород кровли, гранодиоритов и гранитов [4, с. 62]; 5 – горизонт включений в гранитах; 6 – контакт гранитов и «конгломератовидных» гранодиоритов [4, с. 61]; 7 – контакт роговиков кровли и «конгломератовидных» гранодиоритов [4, с. 61]; 8 – аплито-пегматитовое тело с гнездами темноцветных минералов и крупными включениями [4, с. 72].

Таким образом, в отличие от описанных в других регионах мира немногочисленных примеров расслоения гранитных расплавов, выражающихся в основном в распределении темноцветных минералов, в гранитоидах прибрежной зоны Приморья наблюдается

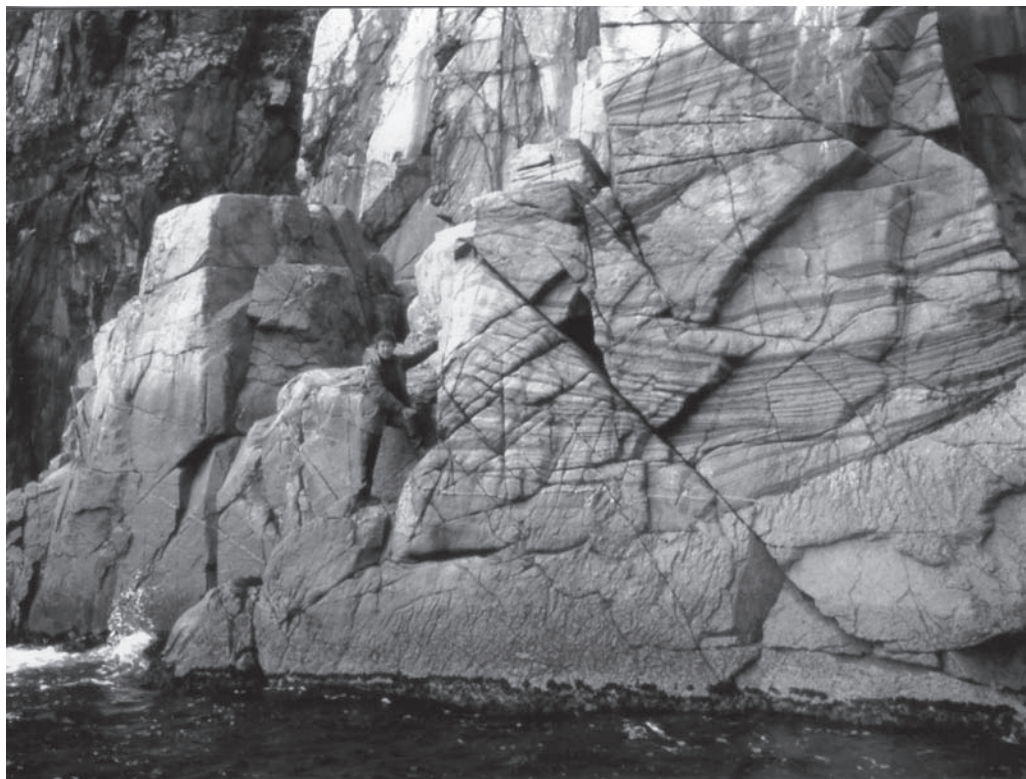


Рис. 9. Полосчатый контакт гранитов и гранодиоритов. Ольгинский интрузив. Фотография береговых скал в южной части мыса Маневского

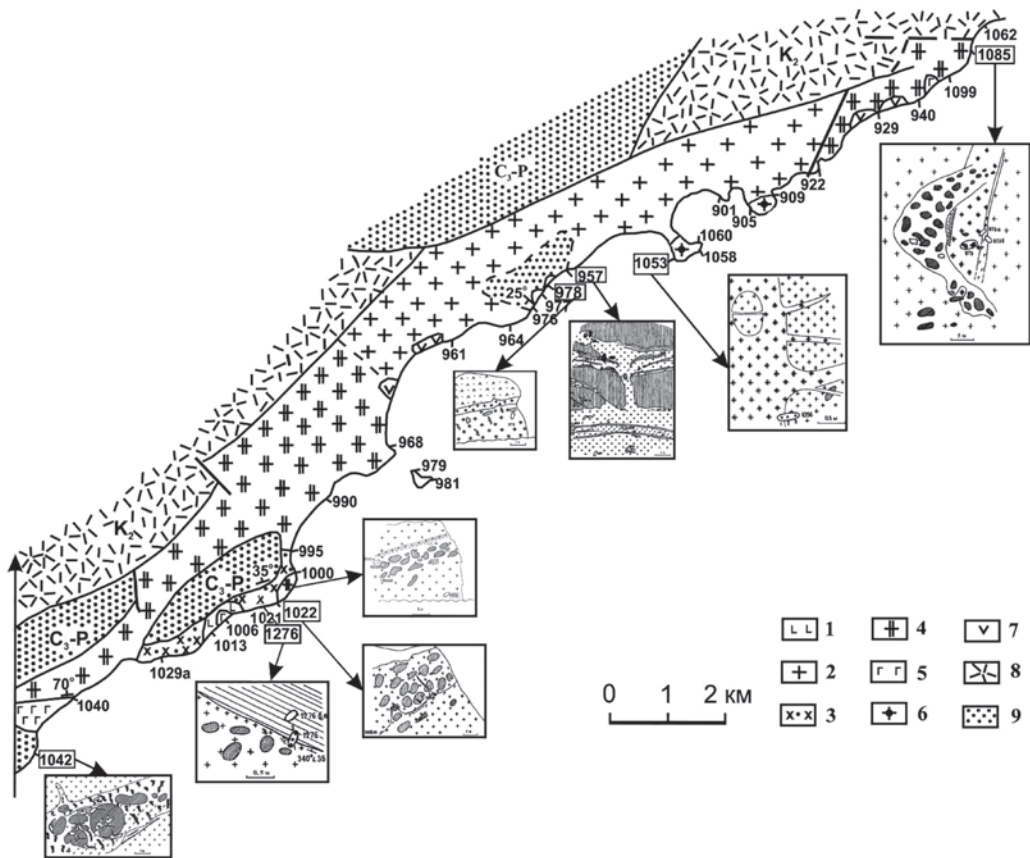


Рис. 10. Геологическая карта Валентиновского массива с врезками зарисовок контактов пород и объектов расслоенных гранитоидов: 1 – диориты; 2–3 – гранодиориты (2 – однородные и 3 – конгломератовидные); 4–6 – граниты (4 – крупнозернистые, 5 – мелкозернистые аплитовидные, 6 – щелочные); 7 – гранит-порфиры; 8 – эффузивы; 9 – ороговикованные осадочные породы

широкий спектр механизмов дифференциации первоначально гомогенного расплава. Распространенность явлений расслоения в массивах прибрежной зоны Приморья делает их уникальными объектами и превращает эту зону в провинцию расслоенных гранитов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Валу́й Г.А. Восточное побережье Приморья – провинция расслоенных гранитов // Природа. 2004. № 11. С. 31–38.
2. Валу́й Г.А. Кавитация и ее проявления в процессе формирования гранитоидов // Вестн. ДВО РАН. 1995. № 3. С. 43–50.
3. Валу́й Г.А. Образование автолитов в гранитоидах как флюидно-магматическое расслоение расплавов // Тихоокеан. геология. 1997. Т. 16, № 1. С. 11–20.
4. Валу́й Г.А. Петрология гранитоидов и дифференциация расплавов в малоглубинных условиях. Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс. Владивосток: Дальнаука, 2014. 245 с.
5. Валу́й Г.А. Пример ритмичной расслоенности в малоглубинном гранитном интрузиве // Докл. АН. 1983. Т. 271, № 2. С. 420–425.
6. Валу́й Г.А. Уникальные примеры расслоения гранитоидных расплавов в интрузивах Прибрежной зоны Приморья // Докл. АН. 1995. Т. 341, № 1. С. 83–88.
7. Valuy G.A. Fluid-magmatic differentiation of the low-water granitic melts as a possible result of cavitation // Water-Rock Interaction – WRI-9 / Eds: G.B. Arehart, J.R. Hulston. Rotterdam: A.A. Balkema, 1998. P. 507–510.
8. Valuy G.A. Local variations of water pressure in felsitic melts // Water-Rock Interaction – WRI-8 / Eds: G.B. Arehart, J.R. Hulston. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995. P. 615–618.