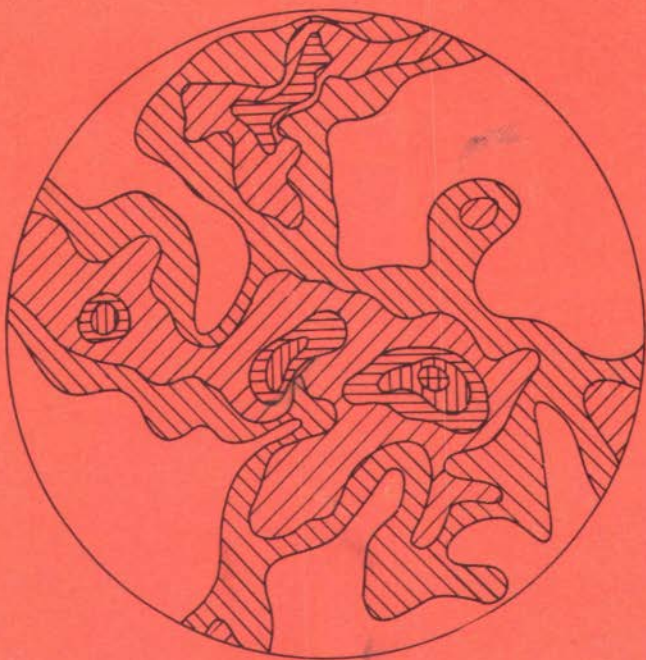


9

В.В. Золотухин

**ОСНОВЫ
МИКРОСТРУКТУРНОГО
АНАЛИЗА
ИЗВЕРЖЕННЫХ
ГОРНЫХ ПОРОД**



НОВОСИБИРСК 1983

**АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ**

В. В. Золотухин

**ОСНОВЫ
МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА
ИЗВЕРЖЕННЫХ
ГОРНЫХ ПОРОД**

НОВОСИБИРСК 1983

УДК 552.11+552.122+552.32

Золотухин В.В. Основы микроструктурного анализа изверженных горных пород / Отв. редактор академик В.С.Соболев. Новосибирск: Изд. ИГиГ, 1983. 47 с.

Излагаются основные сведения и методические приемы по применению широко распространенных минералов – плагиоклаза и оливинов для выявления и изучения ориентировки первичных магматических текстур в изверженных горных породах с целью восстановления их форм залегания и механизма формирования. Приводятся примеры изученных массивов.

Работа может быть использована как руководство для геологов, петрографов, аспирантов и студентов старших курсов, углубленно изучающих специальный раздел петрографии – микроструктурный анализ изверженных и метаморфических горных пород.

Ответственный редактор
академик В.С.Соболев

Рецензенты:

к.г.-м.н. Ю.Р.Васильев (ИГиГ СО АН СССР),
к.г.-м.н. А.А.Проскураков (Новосибирский ун-т)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Если первоначальное приложение микроструктурного анализа в петрографии ограничивалось лишь метаморфическими горными породами (метод Зандера), то затем все большее количество исследователей обращалось к нему в надежде получить полезную информацию о процессах становления массивов изверженных горных пород. Для этих задач требуется прежде всего расшифровка первичных магматических текстур – планпараллельных и линейных. Выявление этих текстур можно произвести по главным породообразующим минералам. Исследований в этой области, к сожалению, проведено не очень много, поэтому автор надеется, что данная работа, имеющая характер руководства (и не только для студентов) с использованием для изучения первичных магматических текстур плагиоклаза и оливина, поможет овладеть основами метода. Характер задач и возможности метода можно уяснить из приводимых примеров изучения конкретных массивов.

Данная работа представляет собой краткое изложение основных методических результатов, которые были накоплены автором более чем за двадцать лет творческого применения микроструктурного анализа к изверженным породам. Первоначально это были эффузивные и гипабиссальные интрузивные породы эффузивного облика Закарпаття (Золотухин, 1960), затем полнокристаллические породы из расслоенных трапповых интрузивов севера Сибирской платформы (Золотухин, 1963, 1964). Для выявления в породах директивных первичных магматических текстур использовалась ориентированность в них идиоморфных кристаллов плагиоклаза, а также оливина – в оливинсодержащих породах дифференцированных интрузий.

Результаты расшифровки полученных ориентирных диаграмм дали автору возможность решать довольно широкий круг задач, связанный с определением условий становления и механизма формирования массивов изверженных пород, примеры которых приводятся в работе. Дается целый ряд практических указаний и советов, облегчающих освоение микроструктурного метода в применении к изверженным породам. Руководство подобного типа отсутствовало в нашей учебно-методической литературе, и автор надеется, что в какой-то мере восполнил этот пробел, а предлагаемая работа будет полезной не только для начинающих геологов и студентов, но и для зрелых специалистов-петрографов.

I. ВВЕДЕНИЕ В ИССЛЕДОВАНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ ТЕКСТУР

Как известно, ориентировка частиц может проявляться во всех типах пород – осадочных, метаморфических и изверженных. Ориентировка в осадочных породах макроскопически проявляется в слоистой текстуре, очень четко – в древних галечниках; в метаморфических – в гнейсовидности их текстур; в изверженных – в полосчатости и линейности расположения составляющих их минералов.

В зависимости от величины зерен применяются макро-, микро- и ультрамикрорисследования ориентировки их в горных породах. В связи с этим различают просто структурный анализ, основывающийся на полевых наблюдениях, и микроструктурный анализ – с использованием кристаллооптических методов изучения и потому близкий к вопросам, рассматриваемым в курсе кристаллооптики. В непрозрачных объектах, а также с еще меньшей величиной зерна, например в глинистых породах, для выявления ориентировки используются уже рентгенографические методы исследования. Не останавливаясь на изучении ориентировок в осадочных и метаморфических породах, которые рассматриваются при описании этих пород, обратимся непосредственно к изверженным породам. Следы течения магмы, обнаруживаемые в изверженных породах в виде слоев и линий течения, имеют большое значение для выяснения форм залегания тел, сложенных этими породами. В частях тел изверженных пород, близких к контактам, следы течения показывают расположение ближайшей ориентирующей поверхности (плоскость истечения) и направление течения магмы (в общем случае, направление растяжения магмы). Совокупность знаний о первичной магматической тектонике (прототектоника) того или иного тела изверженных пород, представленная в виде структурной петрографической карты, дает возможность судить о форме и размерах магматической камеры, направлении движения магмы в ней, последовательности заполнения, иногда даже о месте поступления магмы из глубины, т.е. о подводящих каналах.

Известны два метода в исследовании первичной магматической тектоники изверженных пород.

I. Метод изучения трещиноватости по Клоосу, когда выделяются продольные, поперечные, послойные и диагональные системы трещин. Если принимаются структурные оси "а", "б", "с" по Зандеру, то трещины, располагающиеся

вдоль слоев течения магмы, иногда обозначаются как а b, а поперечные к ним — как ас и бс. Вполне понятно, что возникновение этих систем трещин обязано анизотропии в строении самой породы и, таким образом, анализ основных систем трещиноватости приводит косвенно к представлению о расположении первичной магматической ориентировки минералов в изверженной породе.

2. Метод исследования полосчатости и линейности по признаку неоднородного распределения минералов в породе и по признаку ориентировки самих кристаллов первичных минералов. Здесь можно выделить как макроскопическое изучение (использовалось в работах Э.Клооса, А.А.Полканова, Н.А.Елисеева и многих других), так и изучение методом микроструктурного анализа или иначе — методом Зандера (Sander, 1930). Изучение трещиноватости и расположения первичных магматических минералов основывается на статистике полевых измерений. Перенести эти измерения в лабораторные условия позволяет только микроструктурный анализ. Результаты подвергаются обработке при помощи метода Шмидта (Schmidt, 1925) или сетки Вульфа (Вистелиус, 1958), а на базе готовых ориентирных диаграмм можно строить структурные карты и схемы. Возможность применения к полнокристаллическим породам микроструктурного анализа лимитируется величиной зерна изверженных пород, что обуславливает преимущественное применение его к мелкозернистым гипабиссальным, а также интрузивным породам эффузивного облика и собственно эффузивам. В условиях плохой обнаженности исследователям приходится по отдельным, часто небольшим, коренным выходам изучать геологическое строение района. Как правило, приходится картировать выходы пород, в которых не видно ориентированных текстур течения, плоских миндалин и пузырей, которые рекомендуется использовать при исследовании, часто отсутствует и достоверная пластовая отдельность. В этих условиях большую помощь в определении элементов залегания потоков и мелких интрузий по первичным текстурам течения дает микроструктурный анализ. Фенокристаллы, находящиеся во взвешенном состоянии в магматическом расплаве, в сочетании со сравнительно большой скоростью течения магмы представляют благоприятную возможность для образования в породах ориентированных текстур, которые при малых размерах кристаллов возможно улавливать, применяя микроструктурный анализ ориентированных петрографических шлифов обычного размера.

Как и породы плутонов, породы эффузивного облика можно считать, употребляя термин Зандера, "тектонитами расплава" или "первичными тектонитами" (по Ингерсону и Кнопф). В таких тектонитах фенокристаллы в лава уподобляются плотам, которые плывут по реке, т.е. здесь наблюдается "ориентировка по форме". Как отмечает А.В.Пэк (1939), "в магме, которая двигается, минералы могут быть ориентированы только по форме, и измерению в ориентированных шлифах подлежат определенные грани минералов". Наиболее удобны для этого многочисленные фенокристаллы плагиоклазов и прежде всего в породах ряда липарит-базальт и их интрузивных аналогах эффузивного облика. В случае планпараллельности развитие ориентированного строения контролируется поверхностями. Такие породы можно отнести, употребляя термин Зандера (1930), к так называемым "S-тектонитам", у которых на ориентирной диаграмме имеется хорошо выраженный максимум. Однако встречаются и так называемые "B-тектониты", ориентировка в которых контролируется вращением вокруг оси, нормальной к круговому поясу сферической проекции, в пределах которого располагается полоса пинакоидов, которые нас интересуют. Переходя к типам симметрии диаграмм отметим, что при отсутствии ориентировки имеем беспорядочное распределение максимумов кристаллографических элементов ("изотропность"). В случае S-тектонитов имеем сфероидальный (сферичный) тип симметрии (по Зандеру), в случае B-тектонитов - орторомбический тип симметрии. Для определения текстуры течения (прототектоники) и в итоге элементов залегания пород эффузивного облика, можно отказаться от зандеровских осей координат "a", "b", "c" и привязаться непосредственно к азимуту и углу падения какой-либо плоскости в пространстве.

II. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОРИЕНТИРОВАННОСТИ ПЛАГИОКЛАЗА В МАГМЕ И ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА С ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ

Для исследования ориентировки фенокристаллов плагиоклаза в породах эффузивного облика нужно использовать их второй и третий пинакоиды и первую кристаллографическую ось. Поскольку двойникование в плагиоклазах осуществляется в основном по плоскостям

(010) и (001), можно использовать не только спайность и грани, но и двойниковые швы по этим пинакоидам. Применяя микроструктурный анализ к породам эффузивного облика наиболее важно выяснить закономерности ориентировки фенокристаллов плагиоклаза в магме. В литературе имеются указания, что второй пинакоид обычно располагается параллельно первичной полосчатости, и кристаллы, удлиненные по первой кристаллографической оси, располагаются в направлении течения (таблица I). Параллельно плоскости течения (а б),

Таблица I

Ориентировка плагиоклазов (альбита),
отнесенная к структурным осям а, б, с (по Ферберну, 1949)

Грань кристалла ав	Кристаллографическое направление		
	а	б	с
(010)	[001]	[100]	[010]
(010)	[100]	[001]	[010]
(001)	[100]	[010]	[001]
(100)	[001]	[010]	[100]
(100)	[010]	[001]	[100]

Примечание: а, б и с – структурные оси по Зандеру (Sander, 1930; Елисеев, 1953).

в общем случае, может располагаться любой пинакоид, но чаще второй, то же касается и первой кристаллографической оси (согласно данным Ферберна, 1949, для альбита). Наши наблюдения над ориентировкой фенокристаллов плагиоклаза разной основности в интервале от андезина до анортита были проведены на материале эффузивных пород Закарпатья (Золотухин, 1960). Выяснилось, что бланпараллельность кристаллов плагиоклаза в породах эффузивного облика создается не только по (010), но и по другим кристаллографическим формам, по которым развивается уплощение в кристаллах. В таком случае каждой форме, отражающей ориентирующую поверхность, отвечает свой максимум на ориентирной диаграмме. При неравномерном развитии уплощения по разным простым формам для множества кристаллов плагиоклаза (но в основном с наибольшим уплощением по (010)) эти формы в разных кристаллах могут меняться

друг с другом местами относительно ориентирующей плоскости (плоскости истечения) и создавать на ориентирной диаграмме наложенные максимумы нормалей к граням (рис. I). В общем случае, максимумы нормалей к граням (главным образом пинакоидов) на ориентирных диаграммах располагаются друг от друга на угловых расстояниях, характерных для граней отдельных кристаллов плагиоклазов. Наиболее общий случай — наличие на ориентирной диаграмме трех сравнительно крупных максимумов, отвечающих трем пинакоидам. Углы между двумя максимумами по величине примерно одинаковы (около 90°), третий угол меньше ($60-65^\circ$) или больше (около 116°) и приближаются к углам между пинакоидами в отдельном кристалле плагиоклаза. Таким образом, для каждого отдельного пинакоида на ориентирной диаграмме можно выделить три положения, которые отвечают собственно этому пинакоиду и двум другим пинакоидам благодаря "пинакоидальному обмену". Отмечаются также и "промежуточные" максимумы, косвенно регистрирующие другие формы в кристаллах плагиоклаза. Преобладающая масса вторых пинакоидов кристаллов плагиоклаза в эффузивных и интрузивных породах эффузивного облика располагается параллельно ориентирующей плоскости контакта с вмещающей или подстилающей породой и задает, таким образом, положение для остальной массы сопряженных форм. Основным путем использования получающихся диаграмм заключается в нахождении главных максимумов для $\perp(010)$ и $[100]$. Вопрос использования $[100]$ становится ясен, если учесть, что кристаллы плагиоклаза часто удлинены вдоль этой оси (Фернберн, 1949; Fortey, 1980 и др.). Первую кристаллографическую ось можно найти путем соответствующего графического построения, если знать кроме $\perp(010)$ еще главный максимум $\perp(001)$. Как известно, направление линейности не всегда указывает на направление движения магмы, но всегда указывает на направление растяжения магматических масс, которое либо совпадает с направлением движения, либо перпендикулярно ему (Елисеев, 1956). Чтобы использовать направление $[100]$, которое можно снять с каждой ориентирной диаграммы и толковать его как направление течения магмы, нужно иметь дело с явно приконтактовой (краевой) частью потока или интрузии либо с интрузией типа штока. Чтобы выяснить направление движения магмы относительно средней части потока и интрузивных тел с пологими стенками магматических камер, одного направления $[100]$ недостаточно. Метода-

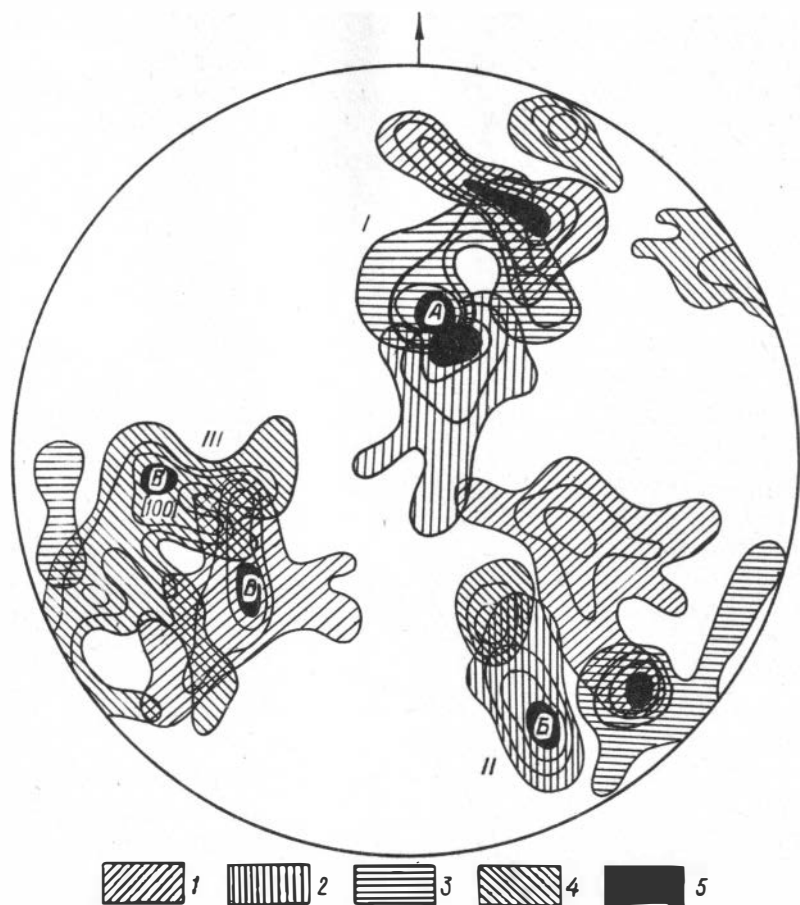


Рис. I. Сводная упрощенная ориентирная диаграмма, составленная по замерам кристаллов плагисклаза интрузивных дацитов у г. Виноградovo в Закарпатье

I - $\perp(100)$; 2 - $\perp(001)$; 3 - $\perp(010)$; 4 - $[100]$; 5 - 8% (максимальная плотность распределения замеров). I, II, III - три группы максимумов. A, B, B' и B'' - главные максимумы для каждой группы (по Золотухину, 1960)

ми микроструктурного анализа в большинстве случаев можно отличить интрузивы от лавовых потоков, если они находятся среди этих потоков и петрографически от них неотличимы. В эффузивах удается выяснить форму тела, направление растягивающих усилий в магме, а в контактах с вмещающими породами можно установить направление выдавливания магмы. В ряде случаев микроструктурный анализ позволил:

- 1) выявить позднейшие внедрения пород в петрографически сходные, но более ранние образования;
- 2) наметить в пределах самих интрузий плоскости подвижек блоков пород;
- 3) отличить интрузивный контакт от тектонического;
- 4) выявить взаимоотношения вулканических пород;
- 5) определить форму ряда экструзивных тел, направление линий течения в магме и в отдельных случаях — даже местоположение подводных каналов (Золотухин, 1960; Костик, Золотухин, 1961);
- 6) отличать настоящие брекчии от псевдобрекчии (измененной породы по сложной системе трещин), которая создает впечатление обычной вулканической брекчии (Золотухин, 1960);
- 7) заметить иногда в интрузивах, куполах и V -образных потоках влияние не одной, а двух ориентирующих поверхностей, каждой из которых отвечают свои максимумы $1(010)$, $1(001)$ и $[100]$.

Аналогичные микроструктурные диаграммы, хотя и менее совершенные, получены нами при изучении ориентировки плагиоклаза в главных дифференциатах ряда дифференцированных трапчатых интрузий северо-запада Сибирской платформы (Золотухин, 1963, 1964; Золотухин, Васильев, 1967). Здесь также можем выделить сопряженные друг с другом основные максимумы. Угловое расстояние между ними обычно около 90° . Худшие условия для развития ориентированного строения в полнокристаллических габбро-долеритах по сравнению с эффузивными стекловатыми породами Закарпатья сказались в резком усилении промежуточных максимумов, когда нелегко, а иногда и невозможно бывает отличить эти максимумы от основных, отражающих расположение пинакоидов кристаллов плагиоклаза в пространстве. Число промежуточных максимумов может быть значительным и тогда они затушевывают расположение основных максимумов и могут создать видимость наличия изотропного внутреннего строения породы. Для расшифровки подобных диаграмм нужно знать расположе-

ние контакта с вмещающими породами, хотя бы в некоторых местах и затем к ним привязывать разрезы через всё интрузивное тело. Как показывают диаграммы ориентировки кристаллов плагиоклаза, и в стекловатых вулканических породах Закарпатья, и в полнокристаллических габбро-долеритах Сибирской платформы, они представляют собой "первичные тектониты" (или "тектониты расплава") и имеют узор В-тектонитов. Один из главных максимумов $\perp(010)$ отражает положение ориентирующей плоскости (контакта), остальные сопряжены с ним и зависят от расположения других граней на кристаллах, что является характерным признаком проявления первичной ориентировки течения.

III. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОРИЕНТИРОВАННОСТИ В МАГМЕ ОЛИВИНА И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПО ОЛИВИНУ

В литературе уже отмечались особенности, проявляющиеся на микроструктурных диаграммах оливина. Обобщающая таблица 2 (Ladurner, 1954) указывает, что α (Np) ориентируется перпендикулярно к полосчатости в породах, в то время как β (Nm) и γ (Ng) образуют пояс. Отмечалось также, что ориентировка определялась общим габитусом кристаллов, для которого характерны следующие формы (100), (010), (001), (110), (021) и др. Причем, самые большие грани, параллельные (010), совпадают с плоскостью полосчатости. Тернер (Turner, 1942) подчеркнул, что в дунитовых интрузиях, внедрившихся во время сильной орогенной складчатости, первичный структурный план определялся течением с образованием характерных петроструктурных узоров с сильной концентрацией Np(α) полюсов, перпендикулярно к макроскопической полосчатости и к поясу, заключающему Nm(β) и Ng(γ) но, по-видимому, этот первичный узор изменяется последующей деформацией с появлением Np(α) пояса, перпендикулярного первоначальным плоскостям течения с образованием концентрации Ng(γ), перпендикулярной к Np(α) поясу. Деформация, превысившая предел упругости породы, приводила к образованию катаклазированного дунита с неориентированным узором диаграмм. Исследования полосчатых троктолитов из Оклахомы (Huang, Merritt, 1952) показали структурные узоры с взаимоперпендикулярными максимумами для α , β и γ и с поясом в плоскости

Ориентировка оливина в некоторых породах (Ladurner, 1954)

Порода	Местоположение	Форма зерен		Ориентировка	
		Уплотненность	Вытянутость	по b	по s
Хромитовый дунит	Шотландия (Skye)	(010)	[001]		(010) полосчат. чат.
Полосчатый перидотит	Шотландия (Rum)	(010)	[001]	[001]	(010) полосчат.
Трещиноватый дунит без полосчатости	Новая Зеландия (Dun)				(010) трещинов. [100] в плоскости трещиноват.
Пироксен-оливиновая порода	Nonsberg	(010)	[001]	[001] с положе-нием S	(010) s
Пироксен-оливиновая порода	Южные Альпы		[001]	[001]	(010)
" "	" "				(010) s
" "	Ultental				(010) s
Полосчатый хромитовый дунит	Малая Азия (Bursa)	(100)	[001]		100 * в s (полосчатость), (100) преимущественно s, (011) по s, [001] с отклонением 30° от 1s

Примечание: S - направление полосчатости и b - линейности ориентированных текстур пород

макроскопической полосчатости. Заметна преобладающая ориентировка (при простом вращении кристаллов) внутри плоскостей ламинарного течения в жидкой среде.

Брозерсом (Brothers, 1959) изучалась первичная ориентировка оливина, возникшая благодаря ламинарному течению вмещающей среды на примере даек основных пород, вулканических neckов и поверхностных потоков Новой Зеландии. Для даек интрузивных оливиновых базальтов были получены узоры, близко согласующиеся с характерной ориентировкой перидотитов, где имеется концентрация α , перпендикулярная к поясу, содержащему β и γ (рис.2). Для оливина Брозерс подчеркивает способность γ -поллюсов замещать α . Причину этой замены он объясняет соотношением величины граней на вращающихся кристаллах, аналогично тому, как нами такой механизм был предложен для объяснения подобной же замены для фенокристаллов плагиоклаза (Золотухин, 1960).

Легкая замена в позиции α и β -поллюсов, зависящая от различных кристаллических габитусов фенокристаллов оливина, как полагает Брозерс, может быть интерпретирована как результат переменного избирательного ориентированного положения в жидкой среде. Когда нормаль к такому поясу есть β -максимум, лежащий в плоскости подосчатости, тогда это направление может рассматриваться как линейный элемент в плоскости течения, показывающий направление движения. В итоге, Брозерс приходит к выводу, что во многих петроструктурных узорах перидотитов контролирующим фактором в ориентировке (выравнивании) зерен оливина была форма кристалла. Из этого не следует, что отрицается роль деформации в возникновении ориентировки оливиновых пород. По-видимому, оба процесса (жидкий поток и деформация в твердом виде) приводят к сходным результатам благодаря тому, что (010) кристаллов склонен располагаться как в плоскости ламинарного течения, так и ориентироваться параллельно к основной S-поверхности во время деформации в оливиновых тектонитах. Резюмируя литературные сведения, подчеркнем, что общая ориентировка оливина и концентрация $N_p(\alpha)$, перпендикулярная к поясу, содержащему $N_m(\beta)$ и $N_g(\gamma)$, дают основание считать, что плоскостной элемент преобладает во время течения, так как $N_p(\alpha)$ перпендикулярен к форме (010), которая обычно обладает намного большими гранями в пластинчатом облике оливина.

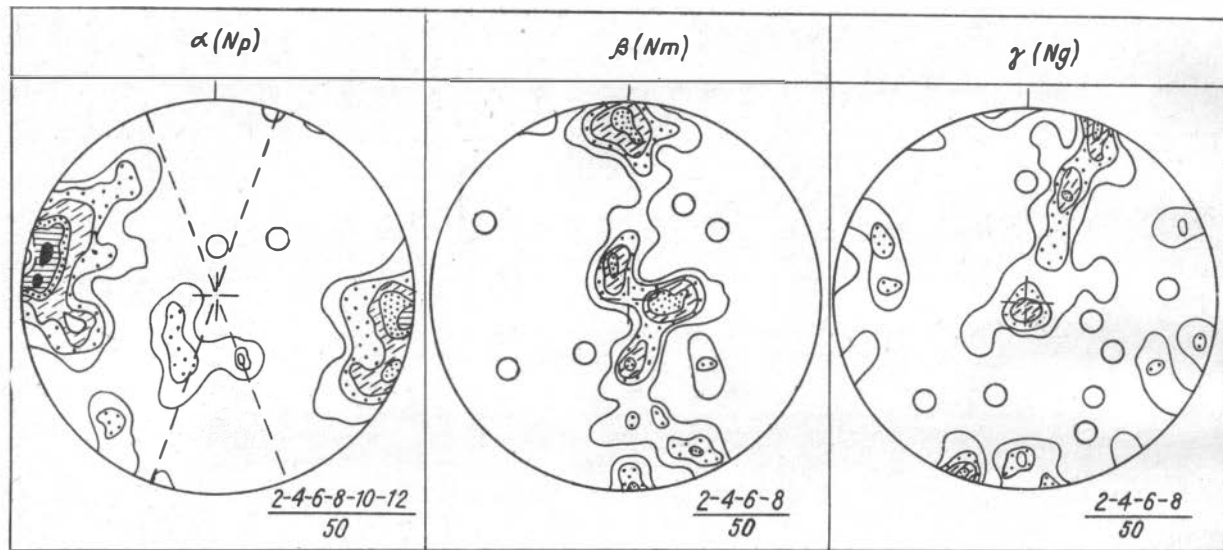


Рис.2. Ориентирные диаграммы оливина (Brothers , 1959) по замерам 50 зерен в одной из базальтовых жил (5I76)

Изолинии 2,4,6,8,10. Пунктирные линии показывают максимальное отклонение в направлении вытянутости лейст полевого шпата основной массы породы

По сравнению с указанными в литературе, исследование ориентировки оливина из различных дифференциатов рудоносных трапсовых интрузий севера Сибирской платформы (Золотухин, 1964; Золотухин, Васильев, 1967) показало несколько отличные их типы. Четко намечается два вида ориентировки (рис.3). Первый — наиболее обычный, когда N_{111} (β) образует крупный отдельный максимум и иногда слабо выраженный пояс, перпендикулярный к этому максимуму. В таком случае N_r и N_g образуют пояса, перпендикулярные к максимуму N_{111} . В их пределах обычно находятся максимумы с повышенной концентрацией, один из которых близок к нормали к контакту. Взаимоотношения максимумов явно ортогональные. Максимум N_{111} отражает линейную вытянутость кристаллов, а пояса N_r и N_g образуются в результате взаимозаменяемости положения (100) и (010) относительно плоскости контакта (рис.3, ор. шл. I9IA и III). Во втором типе также (рис.3, шл. I9I и 60A) проявляется ортогональное расположение максимумов, но сплошных поясов нет, а есть отдельные крупные максимумы, проявляющиеся на диаграммах N_g , N_{111} и N_r и свидетельствующие о взаимозаменяемости по всем трем пинакоидам. Вытянутость кристаллов в этом случае вдоль N_{111} играет, очевидно, подчиненную роль. Подобные же диаграммы по двум типам дал оливин из меймечитов Тулинской интрузии (эффузивовидный аналог гипербазитов с хорошо ограненными фенокристаллами оливина).

В пределах поясов N_g и N_r может быть несколько максимумов примерно одинаковой интенсивности, что уже явно указывает на отсутствие в этом случае какого-либо преобладающего уплощения по (010) или другой грани (в том числе призматической), и следовательно ориентировка здесь зависит прежде всего от линейного элемента, а именно вытянутости по $[001]$ и фиксируется максимумом N_{111} .

В случае взаимозаменяемости по всем трем пинакоидам ориентировка явно зависит от плоскостного элемента (пояса отсутствуют или слабо выражены). Влияние линейного элемента на ориентировку зерен чувствуется лишь в плоскости истечения (параллельно контакту) и фиксируется обычно максимумом N_{111} ($[001]$), но в общем, судя по взаимозаменяемости максимумов, линейный элемент может отражаться и $[100]$ и $[010]$, но в гораздо меньшей степени. Линейность, фиксируемая на диаграммах оливина, может использоваться, как и для кристаллов плагиоклаза, в определении направлений

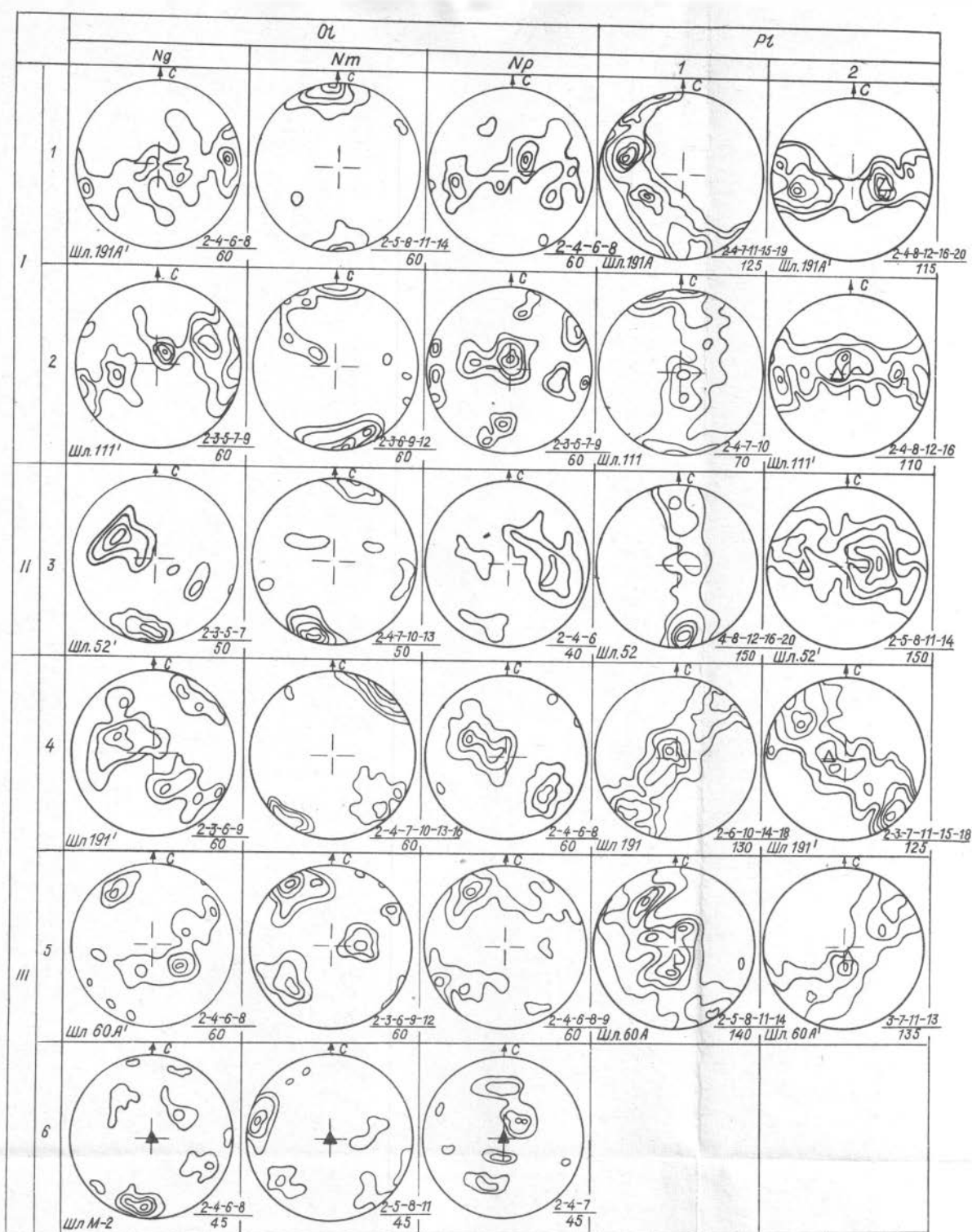


Рис.3. Типы ориентировок оливина, а также микроструктурные узоры плагиоклаза по $\perp(010)$ в изученных образцах оливинсодержащих пород севера Сибирской платформы (по Золотухину, 1964)

Условные обозначения: Ol - микроструктурный узор по оливину, Pl - по плагиоклазу I, 2 - для пикритовых и 3, 4, 5 - для оливиновых и оливинбиотитовых габбро-долеритов интрузии Норильск-I, 6 - для меймечитов Гулинского плутона. Треугольником обозначается нормаль к плоскости а) ближайшего контакта и пластовых трещин для пород из Норильска, б) макропослосчатости для меймечитов. В правом углу дробью обозначается весь набор изолиний, отнесенный к количеству наблюдений (замеров), на котором построена та или иная ориентирная диаграмма. I - преобладающая линейная ориентировка, II - промежуточный тип, III - преобладающая плоскостная ориентировка

растягивающих усилий в магме и линий течения (направления течения) вблизи контактов магматических тел и вмещающих пород. Как показывают многочисленные микроструктурные диаграммы, составленные из одних и тех же образцов, имеет место обычно полная увязка микроструктурных узоров по оливину и полных узоров (составленных по двум ориентированным шлифам) по плагиоклазу. Помимо максимумов, имеющихся на диаграммах оливина, у плагиоклаза появляются еще свои промежуточные максимумы, которые, как говорилось выше, затрудняют отыскание интересующих нас главных максимумов. Сам механизм возникновения ориентировки течения для кристаллов, находящихся в жидкой среде, должен действовать таким образом, что максимумы граней, отражающие контакт, и у кристаллов оливина, и у плагиоклаза должны совпадать, также должны быть близки и максимумы, отражающие линейность. В то же время, учитывая триклинность плагиоклаза ($\angle \beta = 116^\circ$) и ромбическую сингонию оливина, можно полагать, что сопряженные максимумы (непосредственно не отражающие контакта) для плагиоклаза и оливина не будут точно совпадать. Это, по-видимому, дает возможность по признаку совпадения максимумов оливина и плагиоклаза судить о положении контакта, когда наблюдать его в полевых условиях невозможно. В большинстве же случаев мы вынуждены привязывать магматические текстуры пород разреза к тому или иному участку, где контакт с вмещающими породами доступен наблюдению. Сравнение петроструктурных узоров по плагиоклазу и оливину позволяет, как правило, выбрать главный максимум, отражающий положение контакта (планпараллельность в породе) и преобладающий линейный элемент (линейность) в этой плоскости. Такое сравнение при условии повсеместного распространения кристаллов плагиоклаза в породах разреза позволяет выбрать эти направления в породах, где также распространен оливин, и далее по разрезу уже в безоливиновых породах пользоваться исключительно кристаллами плагиоклаза. Отмеченные выше закономерности в ориентировке кристаллов плагиоклаза и оливина достаточно устойчивы и, по-видимому, могут использоваться при изучении аналогичных трапповых интрузий мира.

IV. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРИЕНТИРОВОК ПЛАГИОКЛАЗА И ОЛИВИНА ДЛЯ РАСШИФРОВКИ МАГМАТИЧЕСКИХ ТЕКСТУР СЕРИИ ОСНОВНЫХ ПОРОД И ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ МАССИВОВ

Как показал опыт применения микроструктурного анализа к полнокристаллическим изверженным породам дифференцированных трапповых интрузий, часто имеет смысл использовать не одиночные, а групповые ориентирные диаграммы по плагиоклазу и оливину. При этом можно получать полные микроструктурные узоры по оливину и плагиоклазу из одного ориентированного образца породы, имея два взаимно дополняющих ориентированных шлифа. Во многих случаях эти узоры бывают достаточно близкими у оливинов и плагиоклазов, как это можно видеть (рис.3 и 8) и помогают выявить в породах директивные элементы (планпараллельность и линейность) в данной точке массива, которой принадлежит тот или иной образец. В то же время часто представляет интерес выяснение расположения ориентирующей поверхности и варьирование линий течения на значительном протяжении в каком-либо сечении массива. Информацию об этом можно получить, составив сводные ориентирные диаграммы максимумов для плагиоклазов или для оливинов и просуммировав на одной диаграмме все имеющиеся ориентирные расшифрованные диаграммы, относящиеся к этому разрезу (рис.4,6,10,12). Поскольку при этом получают трудночитаемые диаграммы, то на их базе имеет смысл составлять сводные ориентирные диаграммы второго порядка и по их микроструктурному узору судить об изменении положения ориентирующей поверхности и направлении линий течения (рис.5,7,11,13). Подобные данные, полученные по нескольким разрезам через массив, дают основание для составления его петроструктурной карты или схемы с указанием линий течения и слоев течения (рис.9,15,18). Конкретные фрагменты по отдельным изученным расслоенным массивам северо-запада Сибирской платформы приводятся ниже.

И н т р у з и я Н о р и л ь с к - I. Приводимый фрагмент детального исследования магматических текстур относится к серии образцов из всех пород интрузии от нижнего до верхнего контакта (Золотухин, 1964, разрез II). На сводной вариационной диаграмме (рис.4), составленной по расшифрованным полным (по двум шлифам) ориентирным диаграммам плагиоклаза из пород этого разреза можно видеть ореол главных максимумов $\perp(010)$, отражающих положение

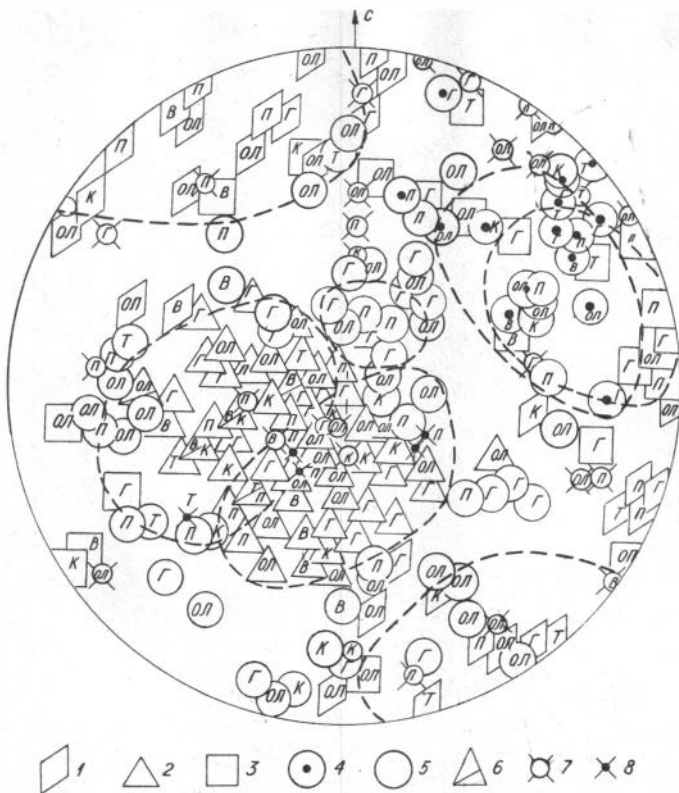


Рис. 4. Диаграмма максимумов плагиоклаза для разреза II по дифференцированной интрузии Норильск I (Золотухин, 1964)

Максимумы, перенесенные с расшифрованных ориентирных диаграмм плагиоклаза из пород разреза, отвечающие: 1 - $\perp(001)$, 2 - $\perp(010)$, 3 - $\perp(100)$, 4 - $\perp[100]$, 5 - нерасшифрованные максимумы, 6 - нормали к наблюдающимся плоскостям контакта с вмещающими породами и между дифференциатами, 7 - нормали к системам макротрещин, 8 - нормали к системам субпараллельных микротрещин. Пунктиром обозначены контуры ореолов максимумов. В - лабрадоровые порфиры из толщи вмещающих пород. Габбро-долериты: к - контактовые, т - такситовые, п - пикритовые, ол - оливиновые и оливин-биотитовые, г - габбро

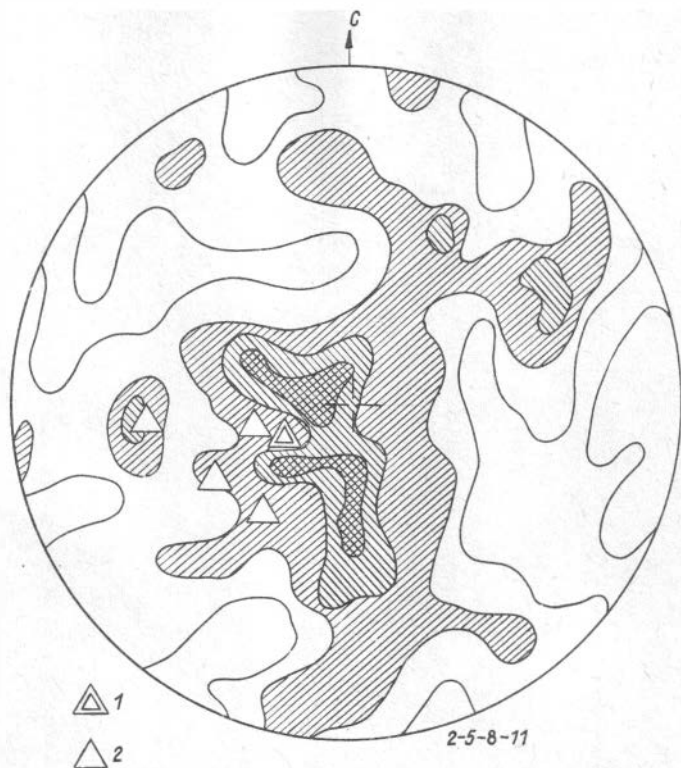


Рис.5. Диаграмма второго порядка, составленная на основе 150 максимумов плагиоклаза из пород разреза II (см. рис.4)

I - нормаль к плоскости верхнего контакта интрузива, 2 - нормали к плоскостям прочих наблюдавшихся контактов, 2-5-8-II - изолинии плотности концентрации максимумов

контакта в этом участке. Ореол перекрывает направления видимых участков контакта и фиксирует изгиб плоскости контакта в нижележащей части интрузива, где его положение не было известно. Сопреженные ореолы максимумов, отражающие положение других пинакоидов имеют субортогональное расположение, причем на диаграммах фиксируются и промежуточные ореолы максимумов. Ореолы максимумов,

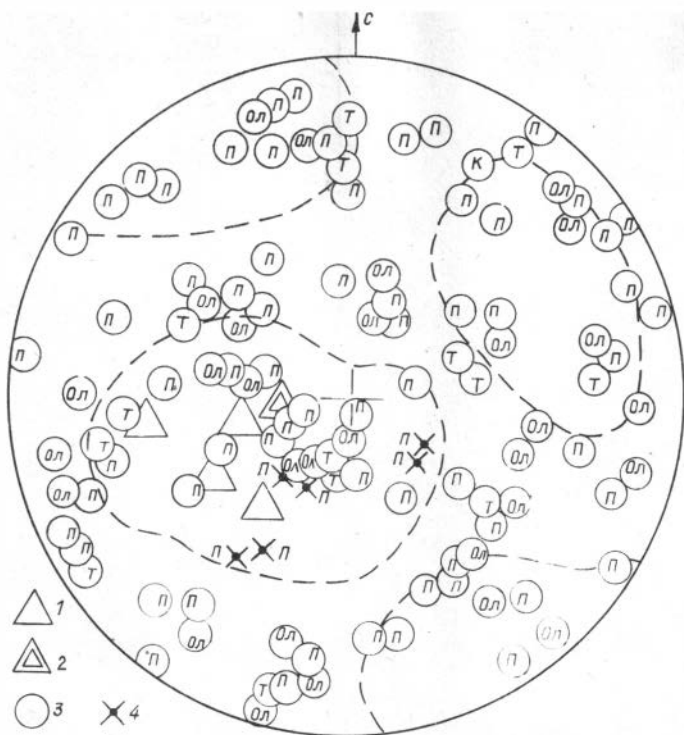


Рис.6. Диаграмма максимумов оливина для пород разреза II

1 - нормали к наблюдавшимся плоскостям контактов, 2 - нормаль к плоскости верхнего контакта интрузива, 3 - максимумы оливина, снятые с ориентирных диаграмм пород разреза; 4 - нормали к системам микротрещин в оливине. Буквенные обозначения см. на рис.4

отвечающих $[100]$ и $\perp(100)$, частично перекрывают друг друга. К ореолам максимумов пинакоидов приурочены и ореолы эндосинкинетических трещин отдельности. К ореолу максимумов, отражающих контакт на диаграмме, приурочен и ореол субпараллельных микротрещин в пикритовых габбро-долеритах. На основе сводной вариационной диаграммы по плагиоклазу была построена сводная ориентирная диаграмма второго порядка (рис.5), где ореолы максимумов от-

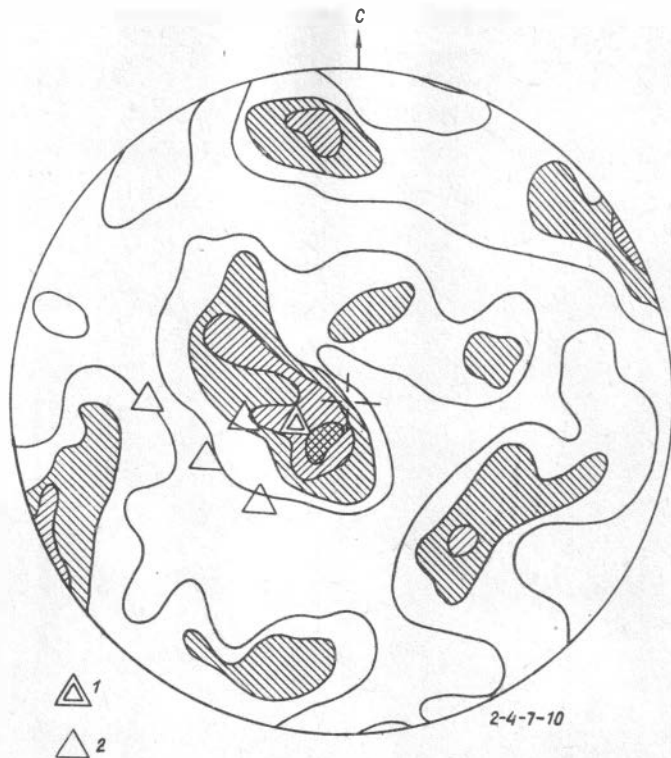


Рис.7. Диаграмма второго порядка, составленная на основе 109 максимумов оливина из пород разреза II. Условные обозначения см. на рис.8. 2-4-7-10 - изолинии плотности концентрации максимумов

развились максимумами микроструктурного узора новой ориентирной диаграммы. Видно, что конфигурация главного максимума отражает изгиб ориентирующей плоскости контакта на этом участке.

На сводной вариационной диаграмме максимумов оливина из пород этого же разреза (рис.6) менее четко проявились соответствующие ореолы максимумов. Гораздо лучше они видны на сводной ориентирной диаграмме второго порядка (рис.7), составленной на основе диаграммы (рис.6). Здесь четко проявились главные максимумы

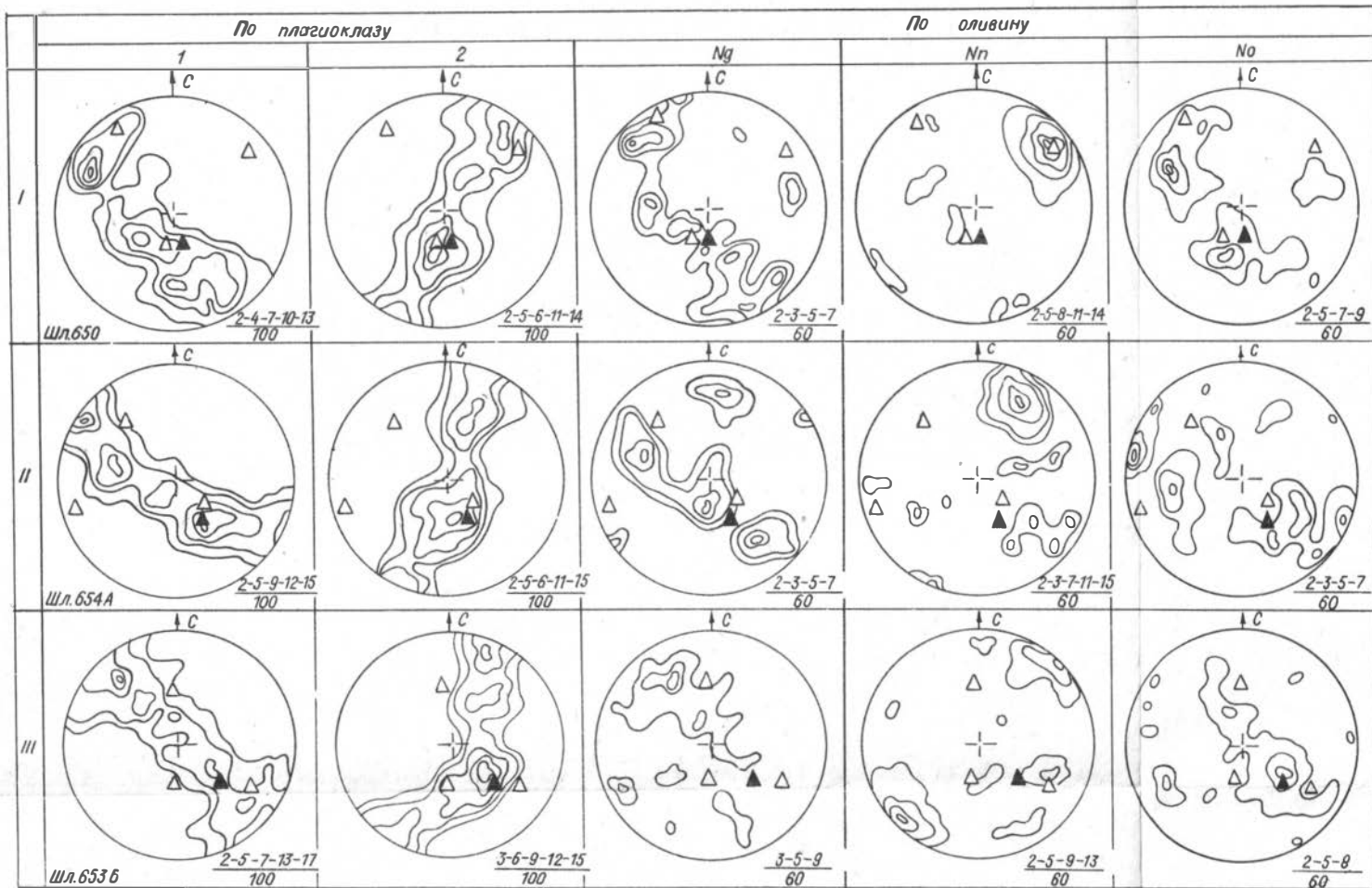


Рис.8. Типы микроструктурных узоров плагиоклаза и оливина из некоторых оливиновых пород интрузии Норильск II (Золотухин, Васильев, 1967)

Черным треугольником обозначается нормаль к плоскости ближайшего контакта, а белым – нормаль к пластовым трещинам. Дробь в правом углу – изолинии плотности распределения замеров (числитель) и количество замеров в шлифе (знаменатель)

пинакоидов с субортогональным расположением, причем один из этих максимумов отражает положение ориентирующей плоскости контакта. Общие петроструктурные узоры диаграмм второго порядка (рис.5,7) по оливины и плагиоклазу близки, причем повторяются даже некоторые промежуточные максимумы. Как можно видеть, первичные магматические текстуры (планпараллельность и линейность) всех дифференциатов, включая промежуточные разности, закономерно повторяют направление ориентирующих плоскостей контакта и вытянутости кристаллов в этих плоскостях.

Н о р и л ь с к - П. При изучении магматических текстур в породах сложного по форме интрузива Норильск II выявляется, как и для пород интрузива Норильск I, сходство узоров диаграмм, построенных по плагиоклазу и оливины. На рис.8 (см. вклейку) можно видеть полные микроструктурные узоры плагиоклаза (по двум шлифам) и соответствующие диаграммы ориентировки оливина из тех же образцов пород интрузии Норильск II. При рассмотрении обнаруживается их близкая аналогия.

Представленная на рис.9 петрологическая схема одного из участков интрузии построена Ю.Р.Васильевым по результатам микроструктурного анализа образцов по плагиоклазу и оливины, нанесенных на обычную структурно-геологическую карту, т.е. произведена расшифровка магматических структур на этом участке. Линии течения, проведенные по замерам первых кристаллографических осей плагиоклаза и третьих кристаллографических осей оливина, указывают направление на север-северо-запад как в пологих, так и в крутых участках интрузива. Изгибающаяся плоскость контакта отражается интенсивными максимумами нормалей к (010) плагиоклаза и оливина на ориентирных диаграммах из различных горизонтов интрузии от контактовых до оливиновых габбро-долеритов, что хорошо видно на вариационной диаграмме (рис.10), построенной по максимумам плагиоклаза из пород этого участка. Здесь имеются три ореола пинакоидальных максимумов, расположенных субортогонально друг к другу. Ореол главных максимумов $\perp(010)$ перекрывает положение нормалей к видимым участкам контакта и пластовым эндосинкинетическим трещинам. Ориентирная диаграмма второго порядка, построенная по многим максимумам плагиоклаза сводной ориентирной диаграммы, представлена на рис.11. Можно видеть, что главный максимум $\perp(010)$ этой диаграммы фиксирует изгиб ориентирующей

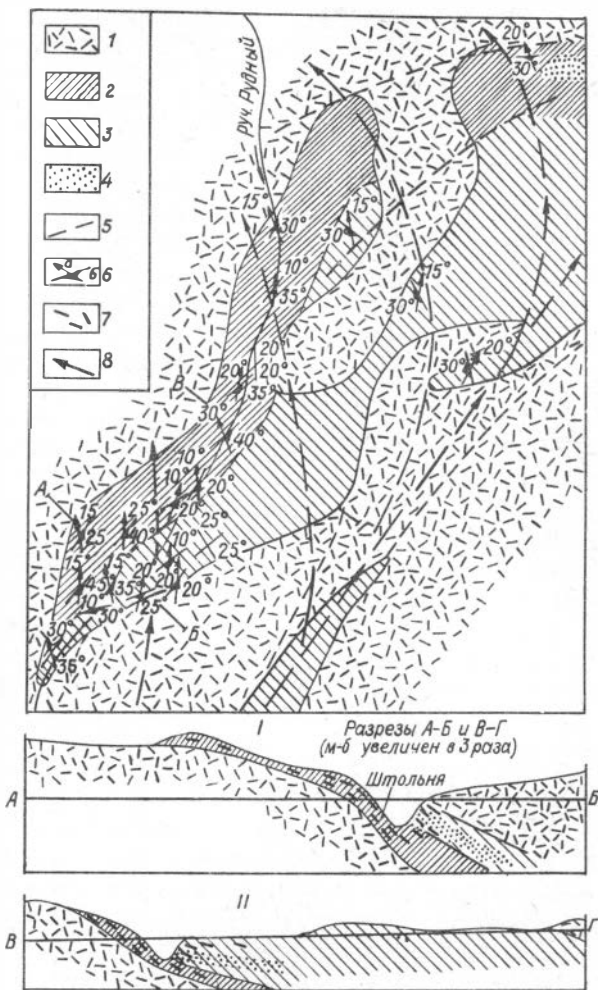


Рис.9. Петрологическая схема одного из участков интрузива Норильск II
(Зо отухин, Васи лев, 1967)

I - породы туфолоавовой то ши, 2 - нижние дифференциаты интрузива: контактовые, такситовые и оливин-биотитовые габбро-долериты, 3 - верхние дифференциаты: оливиновые, безоливиновые габбро-долериты и габбро-диориты, 4 - участки преимущественного развития такситовых пород, 5 - тектонические нарушения, 6 - результаты микроструктурных анализов: а) планпар е ьность кристаллов по (010), б) линейчатость по \perp [100] плагиоклаза и \perp [001] оливина; 7 - планпар ельность кристаллов на разрезах интрузива по АБ и ВГ, 8 - линии течения магмы. Микроструктурные измерения Ю.Р.Васильева

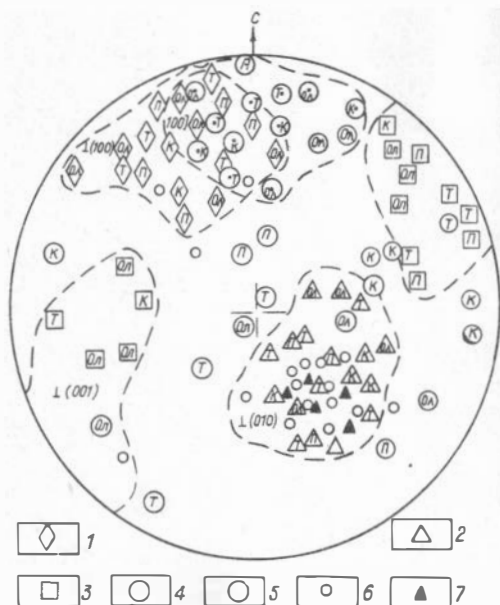


Рис. 10. Диаграмма максимумов плагиоклаза для разреза интрузива Норильск II (Золотухин, Васильев, 1967)

1 - $\perp(100)$, 2 - $\perp(010)$, 3 - $\perp(001)$, 4 - $\perp[100]$; 5 - нерасшифрованные, 6 - нормали к плоскостям пологих макротрещин, 7 - нормали к плоскостям наблюдавшихся контактов интрузива. Габбро-долериты: к - контактовые, т - такситовые, п - пикритовые, ол - оливин-биотитовые и оливиновые. Пунктиром обозначены ореолы максимумов

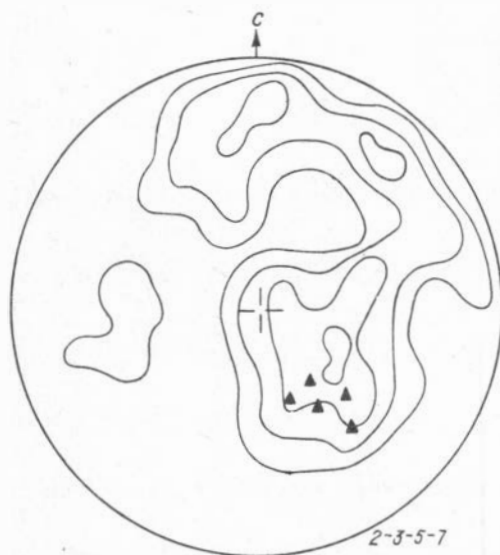


Рис. 11. Диаграмма максимумов второго порядка, составленная на основе максимумов плагиоклаза диаграммы рис. 10
2-3-5-7 - изолинии плотности концентрации максимумов, черные треугольники - нормали к наблюдавшимся контактам



Рис.12. Диаграмма максимумов оливина для разреза интрузива Норильск II (Золотухин, Васильев, 1967)

I - максимумы оливина, снятые с ориентирных диаграмм пород разреза. Буквенные обозначения габбро-долеритов см. на рис.10. 2 - нормали к наблюдавшимся контактам интрузива с вмещающими породами

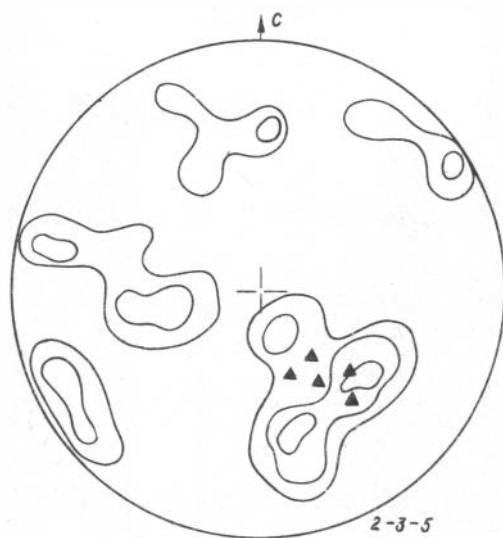


Рис.13. Диаграмма второго порядка, составленная на основе максимумов оливина, диаграммы на рис.12
Обозначения см. на рис.10

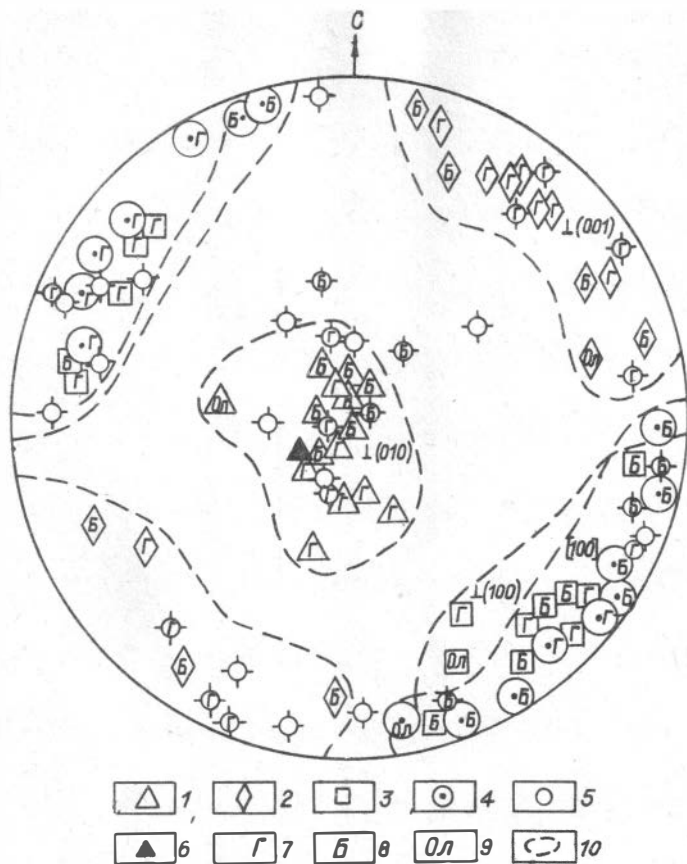


Рис.14. Сводная ориентирная диаграмма максимумов плагиоклаза по род горы Черной (Золотухин, Васильев, 1967)

1 - максимумы $\perp(010)$, 2 - максимумы $\perp(001)$, 3 - максимумы $\perp(100)$, 4 - максимумы $[100]$, полученные построением, 5 - нормали к плоскостям систем макротрещин, 6 - нормаль к плоскости верхнего контакта, 7 - гибридные породы, 8 - безоливиновые габбро-долериты, 9 - оливиновые габбро-долериты, 10 - ограничения ореолов максимумов. Микроструктурные замеры Е.Н.Булгаковой

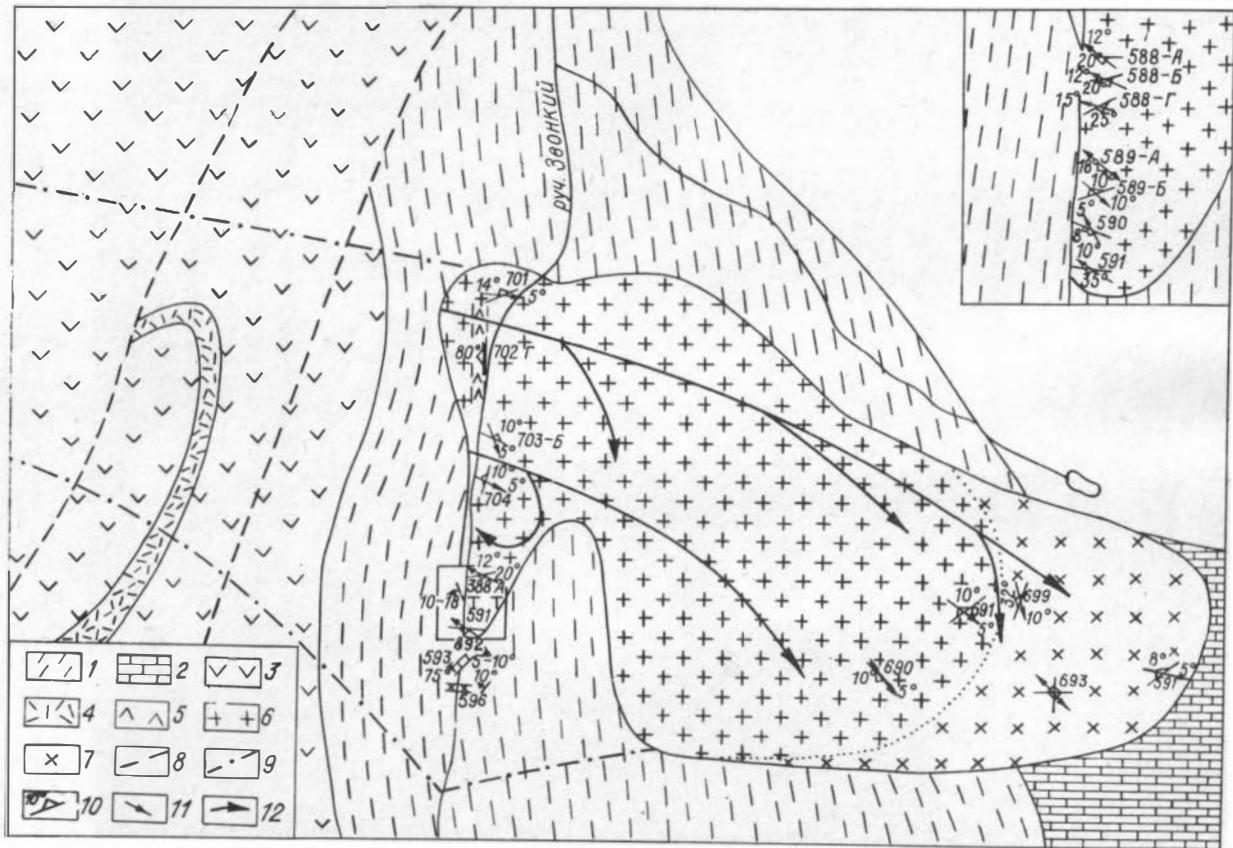


Рис. 15. Петроструктурная схема обнаженной части интрузива горы Черной (Золотухин, Васильев, 1967)

I - песчано-сланцевые отложения тунгусской серии, 2 - мергелисто-сланцевая толща девона, 3 - толща нерасчлененных эффузивных траплов, 4 - туфогенные отложения, 5 - долеритовые дайки, 6 - верхние дифференциаты интрузива, включая оливиновые габбро-долериты, 7 - нижние дифференциаты интрузива (оливин-биотитовые, пикритовые, такситовые габбро-долериты), 8 - линии сбросов, 9 - подземный контур интрузива, установленный бурением, 10 - направление и наклон планпараллельности по $\perp(OIO)$ плагиоклаза, отражающей контакт, 11 - линейчатость по данным микроструктурного анализа, 12 - направление течения в магме (интерпретация данных по линейчатости). Квадратом очерчено местоположение гибридных пород, детализация данных по которым вынесена в правый угол схемы. Микроструктурные замеры Е.Н.Булгаковой

плоскости контакта на этом участке. Сводная вариационная диаграмма максимумов по оливину из того же разреза представлена на рис.12, а соответствующая ей сводная ориентирная диаграмма второго порядка на рис.13. Сводные вариационные диаграммы и ориентирные диаграммы второго порядка демонстрируют соответствие и взаимосвязь магматических текстур дифференциатов друг с другом через весь разрез интрузива, указывая на параллельное формирование дифференциатов и их магматических текстур в процессе однофазного становления интрузива.

Интрузивы горы Черной. На сводной ориентирной диаграмме максимумов плагиоклаза для разреза интрузива горы Черной (рис.14) видно, что ореол главных максимумов $\perp(OIO)$ перекрывает местоположение нормали к наблюдавшемуся участку верхнего контакта. По конфигурации ореола максимумов $\perp(OIO)$ можно судить об ориентировке контакта в северной, а также и в восточной части выходов интрузива. Ореолы максимумов, сопряженных с ореолом $\perp(OIO)$, дают возможность наметить ореол максимумов $[100]$, построенных графически и указывающих направление растягивающих усилий в магме в процессе формирования видимого участка интрузива (рис.15). Судя по совпадению направлений $[100]$ кристаллов плагиоклаза и вытянутости тела интрузива, включая его под-

земный контур, определенный бурением, можно утверждать, что ореол [100] фиксирует в данном случае направление линий течения в магме ($\text{ВЮВ } \angle 5 - 10^\circ$). На петроструктурной схеме интрузива (рис. 15) можно видеть положение линий течения магмы (жирные стрелки, проведенные с учетом направления максимумов [100]). Поперечные ответвления линий течения фиксируют проявление поперечных растягивающих усилий в магме и встречные "турбулентные" завихрения в юго-западном участке выхода интрузии.

И н т р у з и в И м а н г д а. Микроструктурное изучение разреза по р.Имангде, показало, что породы интрузива обладают четкой ориентировкой плагиоклаза и оливина. Закономерности распределения максимумов петроструктурных узоров, полученных на микроструктурных диаграммах те же, что и для интрузии Норильск I. На сводной ориентирной диаграмме максимумов плагиоклаза (рис. 16) для пород разреза видно, что нормаль к наблюдаемой плоскости плоскостности, отражающей расположение плоскости контакта интрузии с вмещающими породами, окружается плотным ореолом максимумов $\perp (010)$. На диаграмме фиксируются также сопряженные ореолы максимумов $\perp (001)$ и $\perp (100)$ и ореол направлений [100], построенный графически. Три сопряженных ореола максимумов перекрываются соответствующими ореолами систем макротрещин (эндосинкинетических). На рисунке 17 представлена ориентирная диаграмма второго порядка, составленная для максимумов плагиоклаза из пород разреза интрузива по р.Имангде. Можно видеть, что сопряженным ореолам (рис. 16) отвечают соответствующие максимумы диаграммы второго порядка (рис. 17). Главный максимум второго порядка отражает среднее направление контакта (аз.пад. $108^\circ \angle 30^\circ$). Графически построенное направление [100] по максимумам второго порядка дает $248^\circ - 260^\circ \angle 24^\circ - 26^\circ$. Это означает, что внедрение магмы и линии её течения направлены с востока на запад в полном соответствии с падением самого пластообразного тела интрузива. На диаграмме также проявились промежуточные максимумы второго порядка, осложняющие узор диаграммы и её расшифровку.

И н т р у з и в г о р ы О з е р н о й (бассейн р.Курейки). Ориентированные текстуры течения в породах дифференцированной интрузии макроскопически почти не заметны. Результаты микроструктурного изучения показывают отчетливую ориентированность кристаллов плагиоклаза и оливина, которые приведены на петроло-

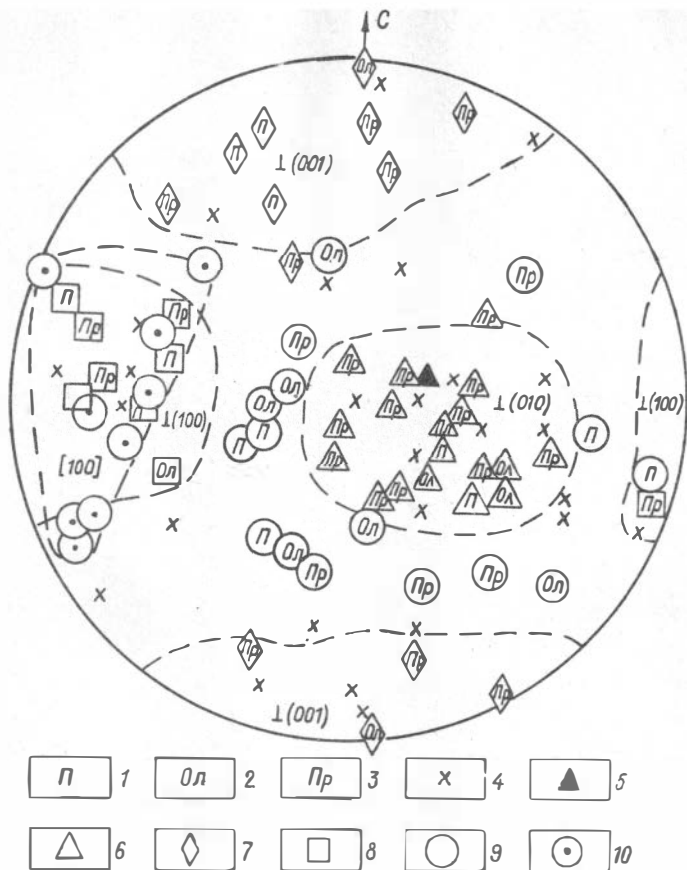


Рис. 16. Диаграмма максимумов плагиоклаза для пород разреза Имандинского интрузива (Золотухин, Васильев, 1967)

Габбро-долериты: 1 - пикритовый, 2 - пойкилоофитовые оливинные, 3 - оливинные призматически офитовые, 4 - нормали к макротрещинам отдельности, 5 - нормаль к плоскости полосчатости в такситизированных пикритовых габбро-долеритах, 6 - максимумы, отвечающие $\perp(010)$, 6 - максимумы, отвечающие $\perp(001)$, 8 - максимумы, отвечающие $\perp(100)$, 9 - нерасшифрованные максимумы, 10 - максимумы, отвечающие $[100]$ (полученные графическим построением). Микроструктурные замеры Ю.Р.Васильева

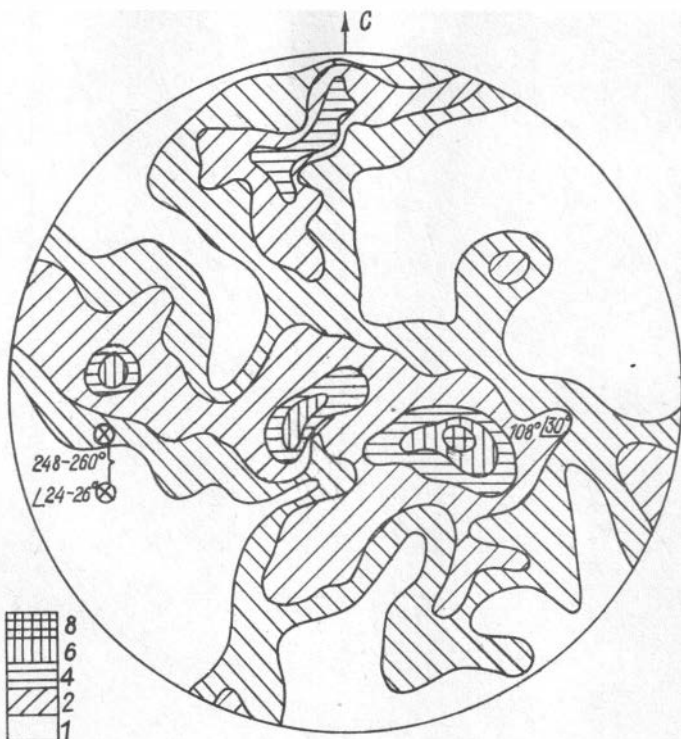


Рис.17. Диаграмма второго порядка для максимумов плагиоклаза пород разреза Имангдинской интрузии (см. рис.16)

Построена на основе 55 максимумов. 8-6-4-2-1 - изолинии плотности распределения замеров

гической схеме интрузива (рис.18). На сводной ориентирной диаграмме максимумов плагиоклаза разреза северной части интрузии (рис.19) можно видеть ореол главных максимумов $\perp(010)$ плагиоклаза, которые тяготеют к нормали к видимому участку контакта. С ореолом максимумов, отражающих положение контакта, сопряжены субортогональные ореолы максимумов, отражающие соответственно расположение в пространстве сопряженных форм кристаллов плагиоклаза. Сюда же приурочены ореолы нормалей к системам эндосинкинетических трещин. Индексом 1 обозначено расположение расшифро-

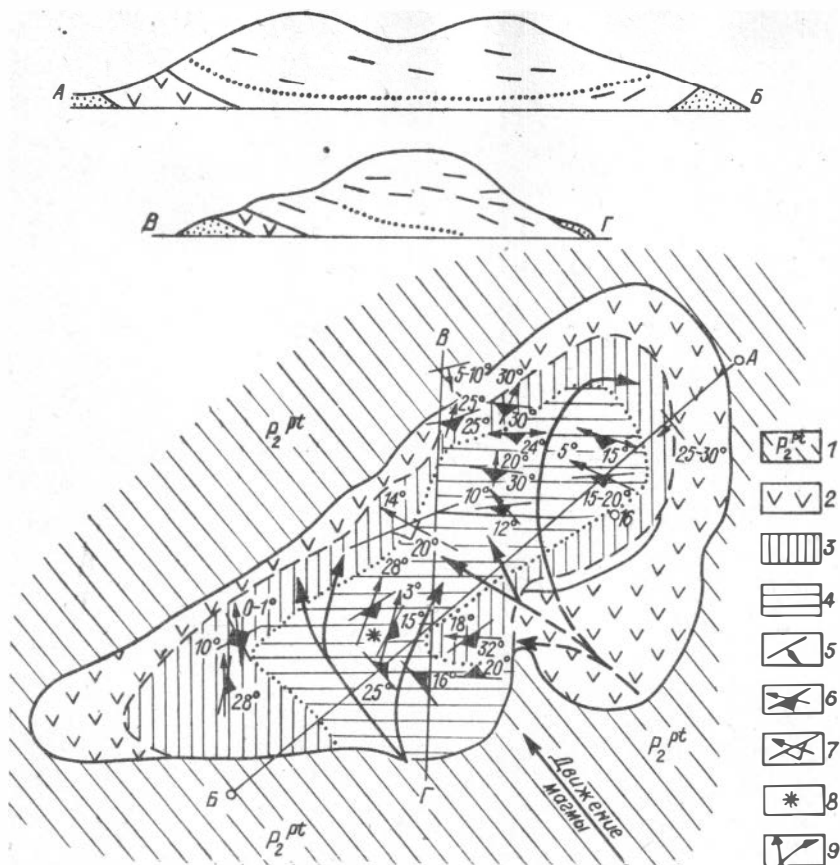


Рис.18. Петрологическая схема интрузии горы Озерной (Золотухин, Васильев, 1967)

1 - песчаники и сланцы верхнепелятकिनской свиты перми, 2 - интрузия пойкилоофитовых долеритов, 3-4 - расслоенная интрузия такситовых габбро-долеритов (3 - нижняя обогащенная оливином часть интрузива, 4 - верхняя, лейкократовая ее часть), 5 - направление контактов и слоистости, 6 - направление планпараллельности и линейчатости по данным микроструктурного анализа плагиоклаза и оливина, 7 - преобладающее направление планпараллельности и линейчатости по оливину для пород разреза северной части интрузива, 8 - местонахождение проявления самородного железа, 9 - направление линий течения магмы (интерпретация данных по линейчатости)

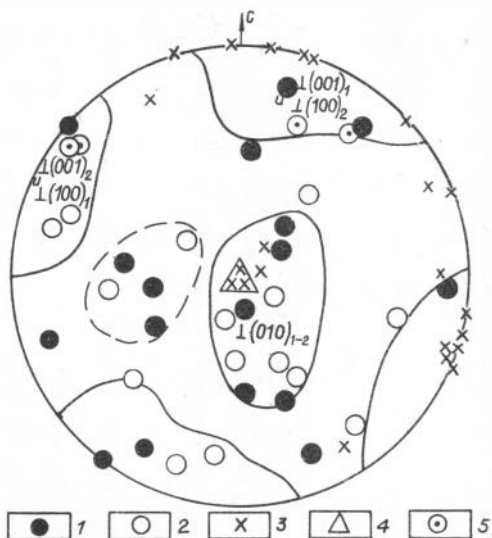


Рис.19. Диаграмма для максимумов плагиоклаза в породах разреза северной части горы Озерной (Золотухин, Васильев, 1967)
 1 - максимумы плагиоклаза пород, обогащенных оливином, 2 - то же, бедных оливином, 3 - макротрещины отдельности, 4 - уплощение пустот, ксенолитов, пластовая отдельность, 5 - направление [100], полученное графическим построением

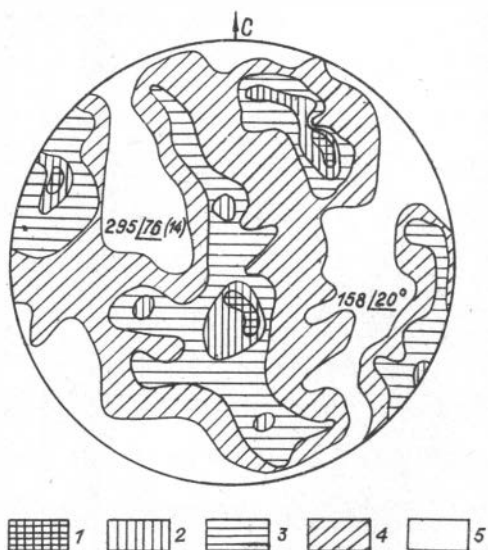


Рис.20. Диаграмма второго порядка для оливина из пород разреза северной части горы Озерной
 Составлена на основании 93 максимумов оливина.
 7-5-3-1 - изолинии распределения плотности максимумов

ванных максимумов кристаллов плагиоклаза на значительном удалении от контакта. Максимумы $[100]$ плагиоклаза, построенные графически, указывают здесь направление на северо-запад. С приближением к наблюдаемому контакту расположение максимумов $[100]$ изменяется (см. символы с индексом 2) на северо-восток при сохранении положения главного максимума $\perp (010)$, отражающего плоскость контакта. Такая же картина фиксируется и по $[001]$ кристаллов оливина и на сводной ориентирной диаграмме второго порядка (рис.20), где четко проявляются три сопряженных субортогональных максимума, один из них отражает направление $[001]$ оливина на удалении от контакта (аз.пад. $295^\circ \angle I4^\circ$), а вблизи контакта оно меняется на северо-восточное. Планпараллельность, отражающая положение контакта и линейность (направления $[100]$ плагиоклаза и $[001]$ оливина), представлены на петрологической схеме интрузии (рис.18). Линиями со стрелками на схеме дана наша интерпретация по этим данным для линий течения в магме и общего направления ее внедрения, причем в южной части интрузива намечается положение подводящего канала.

У. ДОКАЗАТЕЛЬСТВА РЕАЛЬНОСТИ НАБЛЮДАЕМЫХ ОРИЕНТИРОВОК ПЛАГИОКЛАЗОВ И ОЛИВИНОВ

Для того, чтобы доказать, что наблюдаемая ориентировка имеет причинную зависимость, а максимумы не представляют собой случайного скопления точек, мы воспользовались методом " χ^2 -квадрат", как это было сделано А.Б.Вистелиусом (1953), который предложил контроль за наличием ориентировки осуществлять методом χ^2 при многих степенях свободы. При этом замеры ориентировки нормалей к (010) плагиоклаза или осей индикатрисы кристаллов оливина наносятся на равноплощадную сетку, которая разбивается на I^2 равноплощадных сферических участков (рис.21). Затем подсчитывается число точек в каждом участке и вычисляется значение χ^2 по формуле $\chi^2 = \frac{L}{N} \sum_i (n_i - \frac{N}{L})^2$, где N - число наблюдений, по которому строится диаграмма; L - число выделенных на ней участков, $\frac{N}{L}$ - теоретическая частота наблюдений на участке; n_i - число наблюдений в каждом участке. Если распределение будет равномерным величина χ^2 будет стремиться к нулю. При неравномерном распре-

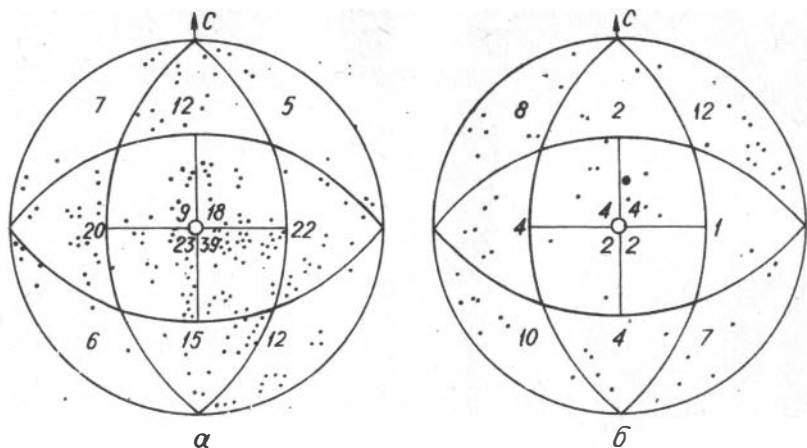


Рис.21. Распределение наблюдений (замеров) ориентировки минералов на микроструктурных диаграммах для одного из образцов интрузива Норильск II при расчетах величин χ^2 : а) для плагиоклаза, б) для оливина

деления (в случае наличия ориентировки величина χ^2 будет больше нуля и тем больше, чем лучше выражена ориентировка. А.Б.Вистелиус (1958) принимает значение надежности α отклонения χ^2 от нуля до данного значения при ν степенях свободы для доказанности ориентировки меньше 0,05. Если величина α больше 0,05, распределение не отличается от равномерного и ориентировка не доказывается. При разбивке проекции на 12 равноплощадных участков (т.е. при $\nu = 11$) "критическое" значение χ^2 составляет 19,7, т.е. для доказанности ориентировки величина χ^2 должна быть больше этой цифры. Величины χ^2 для микроструктурных диаграмм из различных дифференциатов рудоносной интрузии Норильск-II, построенных по плагиоклазу и оливину (Золотухин, Васильев, 1967), свидетельствуют о сильной ориентировке плагиоклаза и заметно менее сильной - у оливина. При этом величины χ^2 для плагиоклаза получались при объединении на одну диаграмму замеров из двух шлифов одного и того же образца, а для оливина значения χ^2 вычислялись для каждой оси отдельно. При количестве наблюдений для оливина менее 50 величина надежности оказывается иногда больше

0,05, т.е. распределение в этих случаях следует считать равномерным, а максимумы — как результат случайной группировки точек. Естественно, что такие диаграммы не учитываются при анализе магматических текстур интрузива.

Проверкой наличия ориентировки методом "хи-квадрат" были также охвачены породы всех дифференциатов рудоносной интрузии Норильск-1.

В контактовых габбро-долеритах как для плагиоклаза, так и для оливина доказываются наличие очень сильной ориентировки, причем, максимальные величины распределения замеров приурочены к тем участкам, где находятся нормали к плоскостям контактов, непосредственно наблюдаемых в горных выработках. Последнее характерно и для других дифференциатов интрузии Норильск-1 и является прямым доказательством основной роли ближайшей плоскости контакта в возникновении ориентировки кристаллов плагиоклаза и оливина.

В такситовых габбро-долеритах повсеместно доказываются отчетливая ориентировка плагиоклаза, а иногда и очень сильная. По оливину, наряду с сильной ориентировкой в других образцах, распределение мало отличается от равномерного. Пикритовые габбро-долериты имеют хорошую ориентировку плагиоклаза, иногда исключительно сильную. Кристаллы оливина, как правило, также хорошо ориентированы, хотя величина χ^2 может значительно отличаться для диаграмм оливина для N_g , N_m и N_p одного и того же образца. Это объясняется, по-видимому, неравномерным развитием тех или иных форм в огранке кристаллов оливина. Положение видимых участков контактов обычно фиксируется максимальными величинами в распределении замеров. В оливин-биотитовых и оливиновых габбро-долеритах доказываются сильная ориентировка плагиоклаза, иногда выраженная чрезвычайно сильно. В последнем случае очень сильно выражена ориентировка и у оливина. Обычно же ориентировка оливина, хотя и доказывается, но гораздо хуже выражена, чем у плагиоклаза. В оливиновых такситовых (верхних) габбро-долеритах и оливиновых габбро доказываются присутствие хорошей ориентировки плагиоклаза, а также оливина. Иногда, как и для части пикритовых габбро-долеритов, в этих породах троктолитового облика ориентировка оливина выражена даже лучше, чем у плагиоклаза. В безоливиновых кварцосодержащих габ-

бро-долеритах, габбро-диоритах и кварцевых габбро доказывається сильная ориентировка кристаллов плагиоклаза. Таким образом, во всех дифференциатах интрузии Норильск-I доказывається сильная ориентировка плагиоклаза, причем она обычно сильнее чем у оливины. Исключением в этом отношении является только часть пород, обогащенных оливином. Полученные величины χ^2 , по которым мы судим об интенсивности проявившейся ориентировки, являются минимальными, и реальная интенсивность будет еще больше. Это объясняется неустранимым дефектом в целом прогрессивного метода А.Б.Вистелиуса, который исключает его использование во всей полноте и заставляет пользоваться им ограниченно, т.е. только для доказательства наличия ориентировки. Речь идет о том, что при произвольной разойвке проекции на равноплощадные участки, часть реально проявившихся максимумов теряется, "рассасывается", т.е. не попадает в один участок, а искусственно делится между несколькими. Это ослабляет реально существующие максимумы до их полного исчезновения. Исходя из этого можно рекомендовать пользоваться при составлении микроструктурных диаграмм методом Пмидта, а для дополнительной оценки результатов по ориентировке - способом, предложенным А.Б.Вистелиусом (1958).

VI. НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА К ОТНОСИТЕЛЬНО МЕЛКОЗЕРНИСТЫМ И ЭФфуЗИВНЫМ ИЗВЕРЖЕННЫМ ПОРОДАМ

Схема применяемого метода та же, что и при обычном микроструктурном анализе: ориентированный образец \rightarrow ориентированный шлиф \rightarrow измерения на федоровском столике \rightarrow статистическая обработка. Имеются, однако, и некоторые специфические особенности, на которых остановимся ниже.

I. Взятие ориентированного образца.

- 1) При взятии ориентированного образца не используем зандровские оси "а", "б", "с".
- 2) Не следует ориентировать образец по хорошо выраженным плоскостям шпатовой отдельности, т.е. параллельно какой-либо плоскостности, плоским пустотам и т.д. Если следы ориентировки заметны, образец нужно взять перпендикулярно этому направлению, для чего лучше сделать молотком искусственную поверхность, не

совпадающую с хорошо выраженными поверхностями, предположительно пластовой отдельности.

3) На выбранной плоскости проводятся (лучше процарапываются) линии простирания и падения, и затем откальвается весь образец, включающий эту плоскость. Значение азимута и угла падения заносятся в дневник при описании данной точки наблюдения.

4) Ориентировать образец нужно по плоскости, представляющей собой висячий бок выступа породы. Если она представляет лежащий бок выступа породы, то в полевом дневнике делается пометка (леж. - лежащий), а при исследовании шлифа придется держать его на столике покровным стеклом вниз.

2. Изготовление шлифа

Шлифы изготавливаются параллельно той плоскости, на которой в поле нанесены знаки ориентировки, причем эта плоскость является верхней, т.е. на ней располагается покровное, а не предметное стекло. При необходимости уже в камеральных условиях из одного и того же ориентированного образца можно изготовить несколько ориентированных образцов, обычно под углом $60-90^\circ$ друг к другу.

3. Измерения на Федоровском столике

1) Для измерения следов течения (ориентирующих плоскостей и направления течения) в эффузивных и интрузивных породах эффузивного облика и мелкозернистых полнокристаллических породах (липариты, дациты, андезиты, базальты, долериты, габбро-долериты, габбро) удобно использовать ориентировку в них фенокристаллов либо просто идиоморфных кристаллов плагиоклаза в мелкозернистых породах, т.е. ориентировку "по форме". Состав их находится в пределах от олигоклаза до анортита.

2) В общем случае, измерения кристаллов плагиоклаза производятся отдельно для второго и третьего пинакоидов, которые в них широко распространены и имеют для наших целей разное значение.

3) Для быстрого определения наименования пинакоида можно использовать методику А.Н.Заварицкого на пятиосном федоровском столике. При определении пинакоидов в плагиоклазах менее основных, чем битовнит, удобно пользоваться гипсовой пластинкой (при совмещении нормали к двойниковой плоскости с осью J и вращением вокруг нее, в случае $\perp (010)$ будет наблюдаться желтая, а в случае $\perp (001)$ - синяя окраска).

4) В главной массе плагиоклазов вторые пинакоиды располагаются параллельно контактам с вмещающими, а для потоков — с подстилающими породами. В случае необходимости могут использоваться и $\perp(001)$ для соответствующих графических построений.

5) Для каждого отдельного пинакоида на ориентирной диаграмме, суммирующей структурные узоры двух шлифов, расположенных друг к другу под углом $60-90^\circ$, в общем случае, можно выделить три положения максимумов, которые отвечают данному пинакоиду и двум другим: около главного максимума $\perp(010)$ появляются максимумы $\perp(001)$ и $\perp(100)$, возле главного максимума $\perp(001)$ появляются максимумы $\perp(010)$ и $\perp(100)$, и, наконец, возле главного максимума $\perp(100)$ появляются максимумы $\perp(010)$ и $\perp(001)$. Там, где появляются промежуточные максимумы, соответствующие еще и призматическим граням, разобраться во множестве максимумов не всегда просто.

6) В общем случае угловые расстояния между максимумами пинакоидов на сводной ориентирной диаграмме и расположение пинакоидов в отдельном кристалле плагиоклаза неплохо совпадают. Используя это обстоятельство, можно по углам между пинакоидами (вернее, между осями, если их нанести в местах пересечения пинакоидов) определить, в случае одинаковой интенсивности двух максимумов, какой из них является собственно $\perp(010)$ и снять с диаграммы расположение первой кристаллографической оси $[100]$, обыкновенно показывающей направление растяжения в магме.

7) Для выяснения характера ориентировки плагиоклазов следует измерить не менее 60 кристаллов плагиоклаза, лучше если замеров будет около сотни.

8) Для изучения ориентированности в породе оливина в таком же количестве зерен измеряются все его оси оптической индикатрицы, для которых составляются отдельные ориентирные диаграммы.

9) Наиболее частый случай, когда на таких диаграммах "построению" оливина ориентирующую плоскость контакта отражает максимум $N_p(\perp(010))$, а два других интенсивных максимума (N_g и N_m) сопряжены с ним и располагаются под углом в 90° к первому, причем, максимум N_m ($[001]$) отражает расположение наиболее вытянутой оси и таким образом направление линейности или растягивающих усилий в магме.

4. Последовательность работы при микроструктурном анализе

1) На диске " " федоровского столика проводим (процарапываем) несколько параллельных линий, лучше всего так, чтобы они были параллельны вертикальной нити окуляра при нулевых установках столика. Устанавливаем на столике шлиф так, чтобы длинная его сторона была параллельна этим линиям, обращая внимание на стрелку, указывающую направление падения плоскости изготовления шлифа. При дальнейших перемещениях шлифа, его длинная сторона должна быть все время параллельной этим линиям. Напомним, что если ориентированный образец (а следовательно, и шлиф) был взят по плоскости, которая представляет собой не висячий бок выступа породы, а лежащий, шлиф должен исследоваться на столике покровным стеклом вниз. Проводим соответствующие наблюдения для плагиоклаза или оливина, или того и другого.

2) Находим плоскость горизонта. Для этого в положении длинного края шлифа, параллельно вертикальной нити окуляра берем отсчет и черточкой наносим направление длинного края шлифа (ближайшее к нулю) на равноплощадную сетку Шмидта. Можно наносить и на сетку Вульфа, по способу предложенному А.Б.Вистелиусом (1953), но с учетом замечаний Д.В.Постникова (1954) или пользоваться соответствующим трафаретом (Елисеев, 1957). При способе проведения, указанном выше, этот отсчет обычно равен нулю. Учитывая направление стрелки на шлифе, наносим линию падения, совмещаем ее с экватором сетки и от края проекции отсчитываем в нужную сторону угол, дополняющий до 90° угол падения плоскости, по которой взят шлиф. Затем определяем точку зенита и проводим плоскость горизонта (рис.22а). Точка зенита лежит на линии падения плоскости шлифа, но относительно центра проекции располагается в противоположную сторону от направления падения плоскости шлифа.

3) Пользуясь уже существующим направлением длинного края шлифа (обычно это 0°) как указателем, наносим измерения нормалей к двойниковым швам и спайностям в плагиоклазе по (010) и (001) или оси оптической индикатрисы — для оливина.

4) После нанесения всех замеров накладываем кальку на лист миллиметровой бумаги и отмечаем все узловые точки на расстоянии 1 см на площади кальки. Если замеров не так много, удобнее узловые точки иметь на расстоянии 1,5 или 2 см.

5) Далее берем картонный кружок с отверстием диаметром 2 см

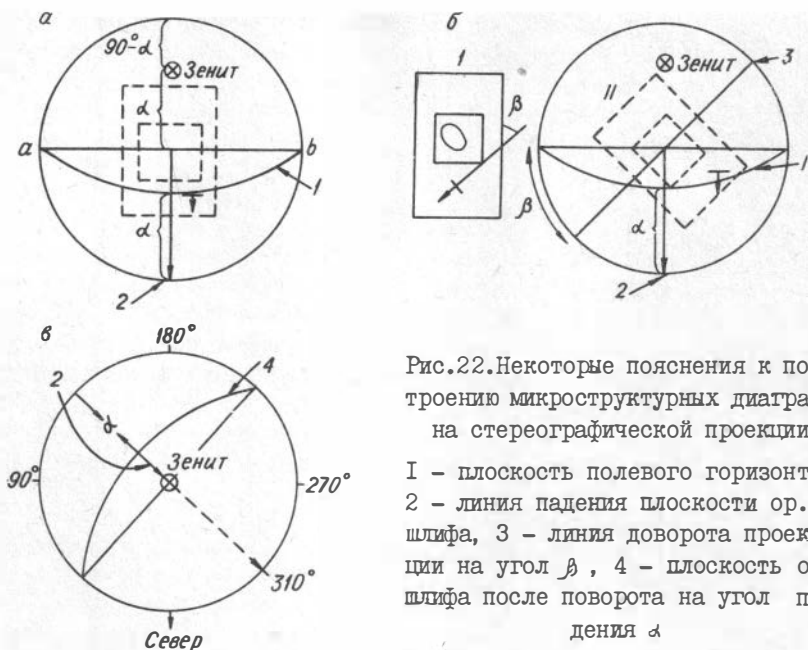


Рис.22. Некоторые пояснения к построению микроструктурных диаграмм на стереографической проекции

I - плоскость полевого горизонта, 2 - линия падения плоскости ор. шлифа, 3 - линия доворота проекции на угол β , 4 - плоскость ор. шлифа после поворота на угол падения α

(3 или 4 см, когда замеров сравнительно немного), а для крайних узлов проекции линейку, состоящую из двух кружков, расстояние между центрами которых - 20 см.

6) Подсчитываем, сколько точек попадает в отверстие круга при наложении его на одну из узловых точек, снятых с миллиметровой бумаги. Рядом с узловой точкой записываем число точек. Рекомендуется около каждой из узловых точек писать две цифры - сумму замеров $\perp(OIO)$ и $\perp(OOI)$ и количество замеров $\perp(OOI)$. Одну из них можно, например, писать чернилами, вторую - карандашом. Если замеров всего 100, а диаметр кружка 2 см ($1/100$ площади круговой проекции), автоматически получаем число процентов. Если мы пользовались кружками диаметром 3 или 4 см для быстрого грубого отыскания максимума, то после этого для уточнения можно использовать кружок диаметром 2 см, перемещая его внутри найденных максимумов, чтобы найти место с наибольшим количеством точек (в процентах) на площади кружка, но обычно этого не требуется, и плотность распределения замеров выражается просто числом точек.

7) Далее поворачиваем проекцию шлифа на угол между зенитом (перпендикуляр к плоскости горизонта) и центром проекции (угол α). Для этого при положении совпадения точки зенита с горизонтальной линией сетки (экватором) переносим по соответствующим параллелям наши узловые точки в нужную сторону (можно переносить точки только с наибольшими значениями) на углы, равные d .

8) После этого определяем направление севера на проекции. Для этого направление линии падения совмещаем с цифрой на сетке, которая отвечает азимуту падения плоскости изготовления шлифа. Против нуля сетки на восковке в сторону от центра рисуем стрелку - "север", т.е. проекция становится ориентированной относительно севера (рис. 22в). Напомним, что шлифы изготавливаются так, чтобы линия падения была параллельна длинному краю шлифа. Если же она не параллельна, то делают соответствующий доворот от края в нужную сторону и тогда, откладывая угол $(90 - \alpha)$, находят зенит (рис. 22).

Используя перенесенные точки, проводим изолинии плотности замеров. Чтобы избежать излишней частоты в их расположении, проводим их через интервал, который определяется из соотношения:

$$s = \sqrt{\frac{n(N-n)}{N}}, \quad \text{где}$$

n - наибольшее значение плотности распределения замеров на проекции и N - общее число замеров.

В случае явной ориентировки плагиоклаза мы будем иметь максимумы, которые представляют собой среднее положение нормалей к данным плоскостям. В частном случае, получаем максимум $\perp (010)$, который отражает положение контакта или поверхности течения магмы. Отсчет угла падения от центра проекции берем при совмещении точки максимума с горизонтальным диаметром проекции и делаем пометку на краю кальки против максимума. Далее совмещаем стрелку севера на проекции с направлением "от нуля" на сетке (т.е. уподобляем проекцию компасу) и против пометки читаем азимут падения для максимума. Направление $[100]$ строится на сетке геометрически при наличии максимумов $\perp (010)$ и $\perp (001)$ и находится так же, с той разницей, что угол наклона отсчитывается от края проекции.

Все прочие детали работы по микроструктурному анализу как для изверженных горных пород, так и для метаморфических пород

можно уяснить из ряда руководств и специальных статей, названия которых приводятся ниже в списке рекомендуемой литературы.

УП. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из главных выводов данной работы является утверждение возможности и целесообразности применения микроструктурного анализа по плагиоклазам и оливинам, как для пород эффузивного облика, так и для полнокристаллических средне- и мелкозернистых изверженных пород, в которых эти минералы имеются в достаточном количестве. Второй вывод вытекает из первого – образцы изверженных горных пород при проведении полевых исследований нужно брать ориентированными, чтобы не потерять важной петрологической информации. Третий вывод, который может быть сделан, – о преувеличенности представлений о большой сложности микроструктурного анализа, которая отпугивает многих геологов большим расходом времени. Можно утверждать, что расход времени не очень велик и при достаточном опыте результаты оправдывают такой расход. Хотелось бы в связи с этим, чтобы молодые геологи не только имели представление о методе, но и владели бы им в должной мере.

Подобные исследования по ориентированности этих породообразующих минералов в изверженных породах не потеряли актуальности и сейчас. На это указывает появление, например, недавней статьи Фортея (Fortey, 1980), из которой также можно уяснить, что все приводимые нами выше главные закономерности их ориентировки справедливы. В то же время в ней устанавливается явная сопряженность ориентировки зерен оливина, плагиоклаза и клинопироксена в расслоенных габбро некоторых кольцевых массивов Шотландии. Таким образом, можно привлечь к широкому изучению ориентированных текстур также кристаллы пироксенов, т.е. практически всю ассоциацию породообразующих минералов базитов, представляющих наиболее распространенную группу пород на Земле.

ЛИТЕРАТУРА

- ВИСТЕЛИУС А.Б. Об обработке микроструктурных диаграмм. - Зап.ВМО, 1953, ч.82, в.4, с.271-280.
- ВИСТЕЛИУС А.Б. Структурные диаграммы. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 156 с.
- ЕЛИСЕЕВ Н.А. Методы петрографического исследования. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1956. 273 с.
- ЕЛИСЕЕВ Н.А. Составление диаграмм по структурному и микроструктурному анализу. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1957. 28 с.
- ЗОЛОТУХИН В.В. Геолого-петрографические исследования Черной горы и прилегающих районов Закарпатья. Киев, Изд-во АН УССР, 1960. 177 с.
- ЗОЛОТУХИН В.В. О предварительных результатах применения микроструктурного анализа к исследованию дифференцированной интрузии Норильск-1. - В кн.: Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, т.1, 1963, с.107-112.
- ЗОЛОТУХИН В.В. О первичной ориентировке течения у кристаллов плагиоклаза и оливина в дифференцированных интрузиях траппов. - В кн.: Базальты плато. М.: Наука, 1964, с.78-87.
- ЗОЛОТУХИН В.В. Закономерности прототектоники и вопросы формирования рудоносных трапповых интрузий (на примере Норильской). М.: Наука, 1964. 177 с.
- ЗОЛОТУХИН В.В., ВАСИЛЬЕВ Ю.Р. Особенности формирования некоторых трапповых интрузий северо-запада Сибирской платформы. М.: Наука, 1967. 230 с.
- КОСТЮК В.П., ЗОЛОТУХИН В.В. К вопросу о формировании гипабиссальных интрузий амфибол-пироксеновых андезитов Закарпатья. - В кн.: Геологич. сб. Львов. геол. об-ва, № 7-8, 1961, с.129-142.
- ПОСТНИКОВ Д.В. О способе разбивки сетки Вульфа на разряды при обработке структурных диаграмм. - Зап. ВМО, 1954, ч.83, вып.3, с.285-287.
- ПЖ А.В. Трещинная тектоника и структурный анализ. М.: Изд-во АН СССР, 1939. 152 с.
- ФЕРНБЕРН Х.В. Структурная петрология деформированных горных пород. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1949. 267 с.
- BROTHERS R.N. Flow orientation of olivine.- Amer.J.Sci, 1959, v.257.

HUANG W.T., MERRITT C.A. Preferred orientation of olivine crystals in troctolite of Wichita Mountains Oklahoma.- Amer. Miner., 1952, v.37.

SANDER B. Gefügekunde der Gesteine. Vienna, 1930.

TURNER E.J. Preferred orientation of olivine crystals in peridotites. - Trans. Roy. Soc., N. Z., 1942, v.72.

LADURNER J. Das vergalten des Olivins als Gefügekorn in einigen Olivingestainen. - Tshermaks. mineral. und petrogr. Mitt., F.3, 1954. Bd.5, H.1-2.

FORTEY N.J. Petrofabrics of laminated gabbros from the centres igneous complex, Ardnamurchan Scotland. - Mineral.Mag., 1980, v.43, p.989-94.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
I. Введение в исследование магматических текстур	5
II. Закономерности ориентированности плагиоклаза в магме и особенности микроструктурного анализа с его использованием	7
III. Закономерности ориентированности в магме оливина и микроструктурный анализ по оливиону	12
IV. Совместное использование ориентировок плагиоклаза и оливина для расшифровки магматических текстур серий основных пород и внутреннего строения массивов	18
I. Интрузив Норильск-I	18
2. Интрузив Норильск-II	23
3. Интрузив горы Черной	29
4. Интрузив Имангда	30
5. Интрузив горы Озерной	30
V. Доказательства реальности наблюдаемых ориентировок плагиоклазов и оливинов	35
VI. Некоторые практические аспекты применения микроструктурного анализа к относительно мелкозернистым и эффузивным изверженным породам	38
I. Взятие ориентированного образца	38
2. Изготовление шлифа	39
3. Измерения на Федоровском столике	39
4. Последовательность работы при микроструктурном анализе	44
VII. Заключение	44
Литература	45

Свод. темат. план, 1983, поз. 14

В. В. Золотухин

ОСНОВЫ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА
ИЗВЕРЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Ответственный редактор
академик Владимир Степанович Соболев

Редактор Р. Н. Ильина

Утверждено к печати
Институтом геологии и геофизики СО АН СССР

Технический редактор Н. Н. Александрова

Подписано к печати 1.02.83. МН 17416.
Бумага 60x84/16. Печ. л. 3,0 + вкл. Уч.-изд. л. 2,85.
Тираж 400. Заказ 58. Цена 20 коп.

Институт геологии и геофизики СО АН СССР
Новосибирск, 90. Ротапринт.

Замеченные опечатки

Гра- фа	Строка	Напечатано	Следует читать
7	18-я сверху	располагается поло- са	располагаются поло- са
13	8-я снизу	100 в s	[100] в s
19	8-я снизу	4 - \perp [100]	4 - [100]
22-23	3-я снизу (подпись к рис.8)	нормаль к пласто- вым трещинам	нормали к системам трещин
24	4-я снизу	линейчатость по \perp [100]	линейчатость по [100]
24	3-я снизу	и \perp [001] оливина	и [001] оливина
25	7-я сверху (подпись к рис.10)	4 - \perp [100]	4 - [100]
35	5-я снизу	$\chi = \frac{L}{N} \sum_i (n_i - \frac{N}{L})$	$\chi^2 = \frac{L}{N} \sum_i (n_i - \frac{N}{L})^2$
39	17-я сверху	образцов	шлифов
41	2-я сверху	На диске " "	На диске "n "